

## بررسی و تحلیل در حوزه زمان - فرکانس جیمینگ شیفت فرکانس دوبعدی در تصاویر یک رادار روزنه مصنوعی مستقر بر سکوی پرتابه‌ای با کاربرد مدافند غیر عامل

سکینه عسگری<sup>۱</sup>، مرتضی کازرونی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

(دریافت: ۹۴/۱۲/۱۳، پذیرش: ۹۵/۰۵/۱۱)

### چکیده

در این مقاله به ارائه روشی برای ایجاد جیمینگ فریب علیه رادار روزنه مصنوعی مستقر بر سکویی با حرکت پرتابه‌ای با استفاده از جمر ساکن مستقر بر روی زمین پرداخته می‌شود. تصویر ایجاد شده در رادار روزنه مصنوعی با استفاده از مدولاسیون دوبعدی فرکانس و روش ایجاد هدف کاذب در مختصات دلخواه با استفاده از الگوریتم برد داپلر بر اساس ارتباط ذاتی بین تأخیر زمانی و خصوصیات شیفت فرکانسی سیگنال تشریح خواهد شد. در نهایت به نتیجه‌گیری درباره شکل رابطه خروجی جیمینگ با استفاده از شیفت فرکانس دوبعدی در رادار روزنه مصنوعی با سکوی پرتابه‌ای پرداخته می‌شود. مطابق با شبیه‌سازی‌ها و با استفاده از روابط بیان شده می‌توان نتیجه گرفت چنانچه جمر در سیگنال راداری یک شیفت فرکانسی ایجاد کند هدف کاذب در راستای سمت با هدف واقعی فاصله خواهد داشت و نیز ایجاد تأخیر زمانی باعث هدفی کاذب را تولید خواهد کرد که در راستای برد با هدف واقعی خواهد داشت. از نتایج به دست آمده از این فعالیت می‌توان در راستای مدافند غیرعامل علیه تهدیدات راداری به‌ویژه ایجاد هدف کاذب در رادار روزنه مصنوعی نیروی متخاصم سود جست.

**واژه‌های کلیدی:** رادار روزنه مصنوعی، هدف واقعی، هدف کاذب، جمر، جیمینگ فریب

### ۱- مقدمه

در عصر حاضر، رادارهای روزنه مصنوعی (SAR) یکی از مهم‌ترین ابزارهای کسب اطلاعات هستند. تصویربرداری توسط فناوری SAR ویژگی‌های منحصر به فردی از منطقه تصویربرداری شده را ارائه می‌دهد که به کمک این ویژگی‌ها می‌توان اطلاعات زیادی را از منطقه تصویربرداری شده استخراج نمود. این اطلاعات سبب شده تا فناوری SAR همواره مورد توجه قرار گیرد و کاربردهای نظامی و غیرنظامی آن هر روز بیشتر شود [۱].

سامانه SAR دارای قابلیت‌هایی مانند برد بسیار زیاد، کاربرد در تمام شرایط آب و هوایی، محدوده‌ی پوشش وسیع، توانایی نفوذ به بعضی از پناهگاه‌های استتار و قدرت تفکیک‌پذیری بالا می‌باشد [۲].

سامانه SAR در واقع یک سنجنده از راه دور فعال است که قادر به تولید تصاویر با قدرت تفکیک بالا در راستای برد و سمت می‌باشد. تکنیک فشرده‌سازی پالس به منظور بهبود قدرت تفکیک در راستای برد به کار برده می‌شود و برای بهتر شدن قدرت تفکیک در راستای سمت، SAR از شیفت فرکانس داپلر بهره می‌برد [۳].

بنابراین جیمینگ<sup>۳</sup> در SAR با جیمینگ در رادارهای معمولی متفاوت بوده و نحوه اثرگذاری آن با رادارهای دیگر تفاوت دارد [۴].

انواع جیمینگ در SAR به دو دسته فعال<sup>۴</sup> و غیرفعال<sup>۵</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند. جیمینگ فعال شامل جیمینگ نویز و فریب<sup>۵</sup> و جیمینگ غیرفعال شامل استفاده از مواد جاذب امواج میکروویو، استتار<sup>۶</sup> پراکنده‌سازهای گوشه‌ای<sup>۷</sup> و غیره به منظور کاهش وضوح تصویر یا تشکیل نقاط با خاصیت پراکنده‌کنندگی قوی می‌باشد [۵].

جیمینگ غیرفعال قادر نیست عملکرد سامانه SAR را دچار اختلال کند، اما می‌تواند با استفاده از مواد، ابزار یا شرایط طبیعی هدف را محو یا وضوح آن را کاهش دهد؛ و یا این‌که اهدافی را در تصویر شبیه‌سازی کند [۶].

جیمینگ نویز با ارسال سیگنال نویز با توان بالا به سمت رادار و در نتیجه کاهش نرخ سیگنال به نویز باعث کاهش کیفیت

2- Jamming

3- Active

4- Passive

5- Deception

6- Camouflage

7- Strong Reflection Angle

\* رایانامه نویسنده مسئول: Kazerooni@mut.ac.ir

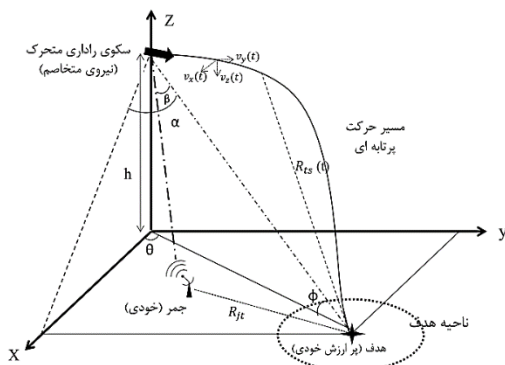
1- Synthetic Aperture Radar

به طور کلی در مراجع بسیار کمی به موضوع ایجاد جمینگ فریب علیه رادار SAR با حرکت پرتابه‌ای پرداخته شده است. کارهای پژوهشی انجام شده نظیر مرجع [۹] فقط به بحث ایجاد جمینگ فریب در راستای سمت پرداخته است و به تشریح روابط به شکل جزئی پرداخته نشده است. در نهایت برای بررسی کارایی راه کار پیشنهادی، نحوه‌ی مقابله با سامانه تصویربرداری SAR در قالب طرح فریب با نرم افزار MATLAB شبیه سازی شده است.

## ۲- اصول سیگنال دهی در SAR

### ۲-۱- هندسه SAR

در شکل (۱) هندسه قرارگیری جمر، SAR و هدف نشان داده شده است. در این سناریو رادار تصویربردار نیروی متخاصم بر روی یک سکوی متحرک با مسیر حرکتی پرتابه‌ای تعبیه شده است و به سمت هدف با ارزش خودی در حال حرکت است.



شکل (۱). سناریوی کلی قرارگیری سکوی راداری، هدف و جمر در یک محیط جنگ الکترونیک

همچنین جمر خودی در فاصله  $R_{Tt}$  از هدف قرار گرفته است و به سمت رادار سیگنال‌های جمینگ ارسال می‌کند. نکته قابل توجه در این سناریو ثابت بودن محل جمر و هدف خودی است. همان طور که ذکر شد هدف از این شبیه سازی این است که جمر سیگنال جمینگی به سمت رادار ارسال کند که در نهایت در تصویر راداری نیروی متخاصم علاوه بر تصویر هدف واقعی، تصویر یک هدف ساختگی هم ایجاد شود تا احتمال تشخیص هدف درست کاهش داده شود.

در این ساختار فرض می‌شود رادار با سرعت  $v$  و شتاب  $a$  در حال حرکت است؛ که برای سهولت محاسبات سرعت و شتاب را در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  تجزیه شده و به صورت  $(v_x, v_y, v_z)$  و  $(a_x, a_y, a_z)$  نوشته می‌شود. جمر و هدف به ترتیب در نقاطی به مختصات  $(x_j, y_j, h_j)$  و  $(x_t, y_t, h_t)$  واقع شده‌اند. هم چنین فرض می‌شود که سکوی پرنده در لحظه  $t_m = 0$  در ارتفاع  $h$  قرار دارد. با این تفاسیر معادله مسیر حرکتی سکوی SAR به صورت رابطه

تصاویر SAR می‌شود. جمینگ فریب سیگنال‌های ارسالی رادار را دریافت کرده و پس از پردازش‌های مختلف آن را دوباره به سمت رادار ارسال می‌کند؛ این فرآیند باعث می‌شود تصاویر ساختگی در رادار SAR ایجاد شود. در این روش به دلیل این که از سیگنال‌های غلط مشابه اکوی واقعی استفاده می‌شود، به بهره پردازشی مشابه اکوی واقعی نیاز است و توان جمینگ مورد نیاز آن به مراتب کمتر می‌باشد [۷]. جمینگ فریب اساساً اهداف ساختگی را در تصاویر SAR ایجاد می‌کند. در این نوع جمینگ جمر سیگنال ارسالی توسط SAR را دریافت کرده و پارامترهایی نظیر دامنه، زمان تأخیر، شیفیت فرکانس و غیره را استخراج می‌کند. با مشخص شدن این پارامترها، برای تولید سیگنال جمینگ دو راه وجود دارد: روش اول به این شکل است که یک یا چند پارامتر از موارد یاد شده سیگنال دریافتی تغییر داده می‌شود و سیگنال بازفرستاده می‌شود. روش دوم بدین صورت است که یک سیگنال جمینگ با خصوصیات سیگنال دریافتی تولید شده و بازفرستاده می‌شود [۸].

جمینگ نویز به انواع مختلفی نظیر جمینگ نویز رادیویی، جمینگ نویز با مدولاسیون دامنه، جمینگ نویز با مدولاسیون فاز، جمینگ نویز با مدولاسیون فرکانس، جمینگ نویز پالس تصادفی با  $PRF^1$  ثابت و جمینگ نویز پالس تصادفی با  $PRF$  متغیر و غیره تقسیم بندی می‌شوند [۵].

استفاده از اصول پدافند غیرعامل نظیر اختفا و فریب برای حفاظت از مراکز مهم و حیاتی در مقابل حملات راداری اهمیت فراوانی دارد و به دلیل سرعت بالایی که جنگ افزارهای نیروهای متخاصم می‌توانند داشته باشند استفاده از جمینگ فریب می‌تواند گزینه مناسبی برای اجرای پدافند غیرعامل باشد.

بر اساس آنچه بیان شد، از دیدگاه پدافند غیرعامل مقابله با این سامانه بسیار مهم و حیاتی است. به همین دلیل در این مقاله با توجه به تهدیدات نوین بر اساس تصاویر SAR، ضمن بررسی اصول سیگنال دهی SAR، نحوه‌ی مقابله با سامانه تصویربرداری SAR در قالب یک طرح فریب با دو روش شیفیت فرکانسی و تأخیر زمانی در راستاهای زمان کند و زمان سریع پردازشی تشریح می‌گردد. هم چنین در راستای اقدامات پدافندی از نوع غیرعامل، تحلیل‌های کمی و کیفی به منظور ایجاد اختلال در رادار روزنه‌ی مصنوعی و تولید هدف ساختگی در تصاویر این نوع رادارها، ارائه شده است و به منظور نشان دادن درستی روش پیشنهادی تحلیل‌ها و شبیه سازی‌های صورت گرفته با استفاده از روش‌های زمان فرکانس انجام شده است. این مقاله به تحقیق جامع تر در خصوص ایجاد جمینگ فریب در SAR با حرکت پرتابه‌ای نسبت به مقالات و پژوهش‌های موجود پرداخته است.

$$\exp \left[ j\pi k_r \left( t_r - \frac{2R(t_m)}{c} \right)^2 \right] \times \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m) \right] \quad (7)$$

که در آن،  $\sigma$  بیانگر سطح مقطع راداری هدف،  $a_r(\cdot)$  دامنه سیگنال ارسالی در راستای برد،  $a_a(\cdot)$  دامنه سیگنال ارسالی در راستای سمت را نشان می‌دهد. هم‌چنین  $t_r$  زمان سریع برای راستای برد است و  $k_r$  نرخ چیرپ و  $c$  سرعت نور و  $\lambda$  طول موج سیگنال ارسالی را نشان می‌دهد.

بر اساس تئوری فاز ایستادن (POSP) [۱۰] طیف سیگنال دریافتی رادار به شکل زیر درخواهد آمد:

$$s_t(f_r, f_a) = A_r(f_r) \cdot a_a(t_m) \times \exp \left[ j2\pi \frac{(f_c + f_r)}{c} R(t_m) \right] \times \exp \left[ -j \frac{\pi f_r^2}{k_r} \right] \quad (8)$$

با انجام فشرده‌سازی در زمان آهسته، طیف دوبعدی سیگنال راداری در حوزه فرکانس به صورت رابطه (۹) خواهد شد [۷].

$$s_t(f_r, f_a) = A_r(f_r) \cdot A_a(f_a) \times \exp \left[ j2\pi \frac{(f_c + f_r)}{c} R(t_m(f_a)) \right] \times \exp \left[ -j \frac{\pi f_r^2}{k_r} \right] \times \exp(-j2\pi f_a t_m(f_a)) \quad (9)$$

و در نهایت طیف دوبعدی سیگنال بازگشتی از هدف نقطه‌ای به صورت رابطه زیر بازنویسی خواهد شد [۷]:

$$SS_t(f_r, f_a) = A_r(f_r) \cdot A_a(f_a) \times \exp[j\theta(f_r, f_a)] \quad (10)$$

همان‌طور که اشاره شد طیف سیگنال SAR حاصل ضرب دو بخش وابسته به فاز و وابسته به دامنه می‌باشد. روابط مربوط به استخراج تابع فاز در مراجع بسیاری از جمله مراجع [۲، ۱۱، ۱۲] آورده شده است که در ادامه به ذکر آن پرداخته می‌شود.

$$\theta(f_r, f_a) = \theta_0(f_a) + \theta_1(f_a)f_r + \theta_2(f_a)f_r^2 + \theta_3(f_a)f_r^3 \quad (11)$$

که در آن، روابط مربوط به  $\theta_n(f_a)$  به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\theta_0(f_a) = f_0(-l_1 + l_2 l_5^2 + l_3 l_5^3 + l_4 l_5^4) + f_a(2l_2 l_5 + 3l_3 l_5^2 + 4l_4 l_5^3) + \frac{1}{f_0}(l_2 + 3l_3 l_5 + 6l_4 l_5^2) f_a^2 + \frac{1}{f_a^2}(l_3 + 4l_4 l_5) f_a^2 + \frac{1}{f_a^3} l_4 f_a^4 \quad (12)$$

$$\theta_1(f_a) = (-l_1 + l_2 l_5^2 + l_3 l_5^3 + l_4 l_5^4) + \frac{1}{f_0^2}(-l_2 - 3l_3 l_5 - 6l_4 l_5^2) f_a^2 + \frac{1}{f_0^3}(-2l_3 + 8l_4 l_5) f_a^3 + \frac{3}{f_0^4} l_4 f_a^4 \quad (13)$$

زیر خواهد بود:

$$a_x t_m^2 + v_x t_m, \frac{1}{2} a_y t_m^2 + v_y t_m, \frac{1}{2} a_y t_m^2 + v_z t_m \quad (1)$$

## ۲-۲- الگوریتم تصویربرداری در SAR

مطابق با شکل (۱) فاصله لحظه‌ای هدف و رادار از رابطه (۲) به دست می‌آید [۷]:

$$R_{ts} = \left( \left( \frac{1}{2} a_x t_m^2 + v_x t_m - x_p \right)^2 + \left( \frac{1}{2} a_y t_m^2 + v_y t_m - y_p \right)^2 + \left( \frac{1}{2} a_z t_m^2 + v_z t_m \right)^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

بسط تیلور رابطه (۱) تا مرتبه‌ی چهار به شکل زیر در خواهد آمد [۷]:

$$R(t_m) = b_0 + \left( b_1 + \frac{Hv_y}{R_c} + \frac{x_c v_x}{R_c} \right) t_m + b_2 t_m^2 + b_3 t_m^3 + b_4 t_m^4 \quad (3)$$

که در آن،

$$\begin{aligned} d_1 &= v_x x_p - H v_z - v_y y_p \\ d_2 &= v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 + H a_z - a_x x_p - a_y y_p \\ d_3 &= a_x v_x + a_y v_y + a_z v_z \\ d_4 &= a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 \end{aligned} \quad (4)$$

و

$$\begin{aligned} b_0 &= \sqrt{H^2 + x_p^2 + y_p^2} \\ b_1 &= -\frac{d_1}{b_0} - \frac{Hv_y}{R_c} - \frac{x_c v_x}{R_c} \\ b_2 &= \frac{\left( \frac{d_1}{b_0} - \frac{d_1^2}{b_0^3} \right)}{2} \\ b_3 &= \frac{\left( \frac{d_1}{b_0} - \frac{d_1^2}{b_0^3} \right)}{2} \\ b_4 &= \frac{\left( \frac{3d_4}{b_0} - \frac{3d_2^2}{b_0^3} - \frac{15d_1^4}{b_0^7} + \frac{18d_1^2 d_2}{b_0^5} + \frac{12d_3 d_1}{b_0^3} \right)}{4!} \end{aligned} \quad (5)$$

اگر رادار یک سیگنال چیرپ به شکل رابطه (۶) به سمت هدف ارسال کند:

$$S(t) = \text{rect} \left( \frac{t}{T_p} \right) \exp(j\omega_c t + j\pi k_r t^2) \quad (6)$$

سیگنال بازگشتی از هدف که رادار دریافت می‌کند به شکل رابطه‌ی (۷) خواهد بود:

$$S_t(t_r, t_m) = \sigma a_r \text{rect} \left( \frac{t_r - \frac{2R(t_m)}{c}}{T_p} \right) \cdot a_a(t_m) \times$$

## ۳-۱- اثر جمینگ در راستای برد

از رابطه (۸) به راحتی می‌توان جمله‌های وابسته به مکان هدف در راستای برد و سمت را از هم تفکیک کرد. با مقایسه رابطه (۳) و رابطه (۸) واضح است که مکان هدف در راستای برد به فاصله هدف تا رادار و در نتیجه به زمان سریع وابسته است. هم‌چنین بر اساس تئوری فاز ایستادن و طیف دوبعدی سیگنال بازگشتی از هدف در حوزه فرکانس، رابطه بین زمان سمت و فرکانس سمت را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۱۷) نوشت [۱۰].

$$\Delta t_r = \frac{-f_{rd}}{k_r} \quad (17)$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$f_{rd} = k_r \times \Delta t_r \quad (18)$$

پس اگر جمر بتواند یک سیگنال جمینگ مشابه سیگنال اصلی رادار اما با تأخیر به سمت رادار ارسال کند، خواهد توانست که در تصویر راداری یک هدف کاذب که در راستای برد با هدف واقعی فاصله دارد ایجاد کند. فاصله هدف ساختگی تا هدف واقعی با تغییر میزان زمان تأخیر قابل تغییر خواهد بود.

اگر جمر بخواهد هدف ساختگی را در نقطه  $(x_t + i\Delta x, y_t, h_t)$  ایجاد کند، (که  $i$  یک عدد طبیعی و  $\Delta x$  اندازه قدرت تفکیک در راستای برد است). فاصله لحظه‌ای هدف ساختگی از سکوی راداری از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} R(t_m, x_t + i\Delta x, y_t, h_t) &= \left( \left( \frac{1}{2} a_x t_m^2 + v_x t_m - x_p - i\Delta x \right)^2 + \left( \frac{1}{2} a_y t_m^2 + v_y t_m - y_p \right)^2 + \left( \frac{1}{2} a_z t_m^2 + v_z t_m \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\cong R(t_m) + \frac{\left( \frac{1}{2} a_x t_m^2 + v_x t_m - x_p \right) i\Delta x}{R(t_m)} + \frac{(i\Delta x)^2}{2 \times R(t_m)} \end{aligned} \quad (19)$$

بنابراین تأخیر زمانی متناظر با این فاصله از رابطه (۲۰) محاسبه خواهد شد:

$$\begin{aligned} \Delta t(x_t + i\Delta x, y_t, h_t) &= \frac{R(t_m, x_t + i\Delta x, y_t, h_t) - R(t_m)}{c} \\ &= \frac{\left( \frac{1}{2} a_x t_m^2 + v_x t_m - x_p \right) i\Delta x}{R(t_m) \times c} + \frac{(i\Delta x)^2}{R(t_m) \times c} \end{aligned} \quad (20)$$

و در نهایت برای ایجاد هدف کاذب که در راستای برد در فاصله دلخواه از هدف واقعی واقع شده باشد، سیگنال جمینگ در حوزه زمان به شکل زیر باید تولید شود [۹]:

$$\begin{aligned} \theta_2(f_a) &= \frac{1}{f_0^3} (l_2 + 3l_3 l_5 + 6l_4 l_5^2) f_a^2 \\ &+ \frac{1}{f_0^4} (l_3 + 12l_4 l_5) f_a^3 \\ &+ \frac{6}{f_0^5} l_4 f_a^4 - \frac{\pi}{k_r} \end{aligned} \quad (14)$$

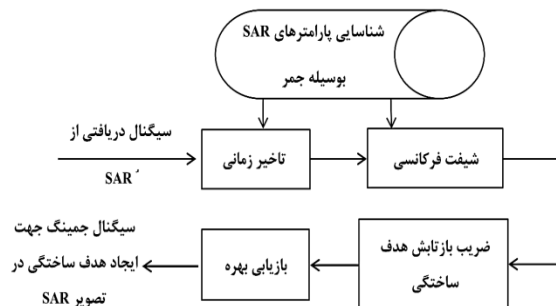
$$\begin{aligned} \theta_3(f_a) &= \frac{1}{f_0^4} (-l_2 - 3l_3 l_5 - 6l_4 l_5^2) f_a^2 + \\ &\frac{1}{f_0^5} (-4l_3 - 16l_4 l_5) f_a^3 - \frac{10}{f_0^6} l_4 f_a^4 \end{aligned} \quad (15)$$

در روابط فوق پارامترهای  $l_n$  به شکل زیر خواهند بود:

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{4\pi b_0}{c} \\ l_2 &= \frac{\pi c}{4b_2} \\ l_3 &= \frac{\pi c^2 b_3}{32b_2^3} \\ l_4 &= \frac{\pi c^3 (9b_3^2 - 4b_2 b_4)}{8b_2^5} \\ l_5 &= \frac{2b_1}{c} \end{aligned} \quad (16)$$

## ۳- ایجاد جمینگ در رادار روزنه مصنوعی

در شکل (۲) فلوچارت تولید سیگنال جمینگ توسط جمر نشان داده شده است. همان‌گونه که در فلوچارت دیده می‌شود نحوه عملکرد جمر برای تولید سیگنال جمینگ فریب به این صورت است که جمر سیگنال ارسالی از SAR از دریافت کرده، پارامترهای راداری را تخمین زده و به وسیله شیفت فرکانسی و یا تأخیر زمانی سیگنال جمینگ فریب را تولید کند. قبل از ارسال سیگنال جمینگ به سمت هدف لازم است ضریب تابشی هدف ساختگی و ضریب بازتابی بهره نیز به سیگنال جمینگ اعمال شود تا تضعیف ناشی از مسیر و پردازش‌ها جبران شده و سیگنال جمینگ در گیرنده رادار با توان مطلوبی دریافت شود.



شکل (۲). فلوچارت تولید سیگنال جمینگ فریب

رابطه بین میزان شیفت فرکانس و فاصله بین هدف ساختگی تا هدف واقعی از رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۱۳]:

$$\Delta x_a = -2\theta'_0(f_{ad})v_x(0) \quad (26)$$

که در رابطه فوق،  $\theta'_0(f_{ad})$  مشتق مرتبه اول  $\theta_0(f_a)$  می‌باشد. با توجه به مطالب گفته شده در بخش‌های ۱-۳ و ۲-۳ می‌توان یک رابطه کلی برای ایجاد هدف کاذب در محلی که هم در راستای سمت و هم در راستای برد با هدف واقعی فاصله داشته باشد به شکل رابطه (۲۷) طرح‌ریزی کرد.

$$s_t(f_r, f_a) = A_r(f_r) \cdot A_a(f_a) \times \exp \left[ j2\pi \frac{(f_c + f_r + f_{rd})}{c} R(t_m(f_a + f_{ad})) \right] \times \exp \left[ -j \frac{\pi(f_r + f_{rd})^2}{k_r} \right] \times \exp[-j2\pi(f_a + f_a) t_m(f_a + f_{ad})] \quad (27)$$

#### ۴- تحلیل در حوزه زمان-فرکانس

در یک نگاه کلی، هدف از اعمال یک تبدیل ریاضی بر یک سیگنال، به دست آوردن اطلاعات اضافی است که در سیگنال خام اولیه قابل بهره‌برداری بوده اما در دسترس نیست.

حوزه جدید که حوزه زمان-فرکانس تلفیقی نامیده می‌شود، می‌تواند محتوای زمانی و فرکانسی سیگنال را به طور هم‌زمان در اختیار قرار دهد. مزیت این روش این است که هیچ‌یک از خصوصیات از سیگنال از دست نمی‌رود و با این تحلیل می‌توان خصوصیات مطلوب موردنظر را به خوبی از سیگنال استخراج کرده و مورد مطالعه قرار داد [۱۴].

تحلیل زمان-فرکانس، سیگنال تک‌بعدی را به صفحه دوبعدی زمان-فرکانس برده و باید انرژی سیگنال را در یک زمان و فرکانس خاص نشان دهد.

با توجه به موارد ارائه شده و نیازهای مورد نظر، روشی که در ادامه این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد، تحلیل در حوزه زمان-فرکانس است. چراکه با این تحلیل می‌توان خصوصیات زمانی و فرکانسی سیگنال را به صورت هم‌زمان در نظر گرفته و مورد مطالعه قرار داد.

روش‌های زمان-فرکانس زیادی جهت تحلیل سیگنال SAR وجود دارند که دارای ویژگی‌های مختلفی می‌باشند. روش مورد استفاده در شبیه‌سازی این مقاله به شرح زیر می‌باشد:

تبدیل STFT هم برای سیگنال‌های ایستاد و هم غیرایستاد کاربرد دارد. در سیگنال‌های غیرایستاد تبدیل STFT با تابع پنجره، سیگنال اصلی را به بخش‌های به حد کافی تقسیم می‌کند که در هر کدام از این بخش‌ها می‌توان فرض ایستاد بودن را برقرار

$$s_t(t_r, t_m, x_t + i\Delta x, y_t, h_t) = \sigma a_r \text{rect} \left( \frac{t_r - \frac{2R(t_m)}{c}}{T_p} - \frac{\Delta t(x_t + i\Delta x, y_t, h_t)}{T_p} \right) \cdot a_a(t_m) \times \exp \left[ j\pi k_r \left( t_r - \frac{2R(t_m)}{c} - \Delta t(x_t + i\Delta x, y_t, h_t) \right)^2 \right] \times \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m, x_t + i\Delta x, y_t, h_t) \right] \quad (21)$$

همان‌طور که در رابطه (۱۸)، بیان شد تأخیر زمانی در حوزه زمان مشابه تأخیر فرکانس  $f_r$  در حوزه فرکانس است. در نتیجه با توجه به روابط (۹) و (۱۸) طیف سیگنال بازگشتی از هدف در حوزه فرکانس به صورت زیر خواهد بود:

$$s_t(f_r, f_a) = A_r(f_r) \cdot A_a(f_a) \times \exp \left[ j2\pi \frac{(f_c + f_r + f_{rd})}{c} R(t_m(f_a)) \right] \times \exp \left[ -j \frac{\pi(f_r + f_{rd})^2}{k_r} \right] \times \exp[-j2\pi f_a t_m(f_a)] \quad (22)$$

رابطه بین میزان شیفت فرکانس و فاصله بین هدف ساختگی تا هدف واقعی از رابطه زیر محاسبه خواهد شد [۱۳]:

$$\Delta x_r = \frac{-f_{rd}c}{2k_r} \quad (23)$$

#### ۳-۲- اثر جمینگ در راستای سمت

برای ایجاد یک هدف کاذب در تصویر راداری که در راستای سمت با هدف واقعی فاصله داشته باشد، جمر باید بتواند جمله‌های متناظر با مکان هدف در راستای سمت در رابطه (۷) را تحت تأثیر قرار دهد و یا سیگنال جمینگ تولید کند که فقط در مؤلفه‌های مربوط به سمت با سیگنال اصلی متفاوت باشد. همان‌طور که در رابطه (۸) مشخص است عبارات متناسب با زمان آهسته مکان هدف در راستای سمت را مشخص می‌کنند. اگر جمر شیفت فرکانس در سیگنال دریافتی از رادار ایجاد کند و سپس آن را به سمت رادار ارسال کند در تصویر راداری هدف کاذبی ایجاد خواهد شد که در راستای سمت با هدف واقعی فاصله دارد. میزان این فاصله با مقدار شیفت فرکانسی ایجاد شده توسط جمر رابطه دارد و بنابراین با تغییر اندازه شیفت فرکانسی، فاصله هدف ساختگی از هدف واقعی قابل تغییر خواهد بود. بر اساس تئوری فاز ایستاد، فرکانس سمت متناسب با زمان سمت به صورت رابطه (۲۴) است [۱۳].

$$\Delta t_a = -2\theta'_0(f_{ad}) \quad (24)$$

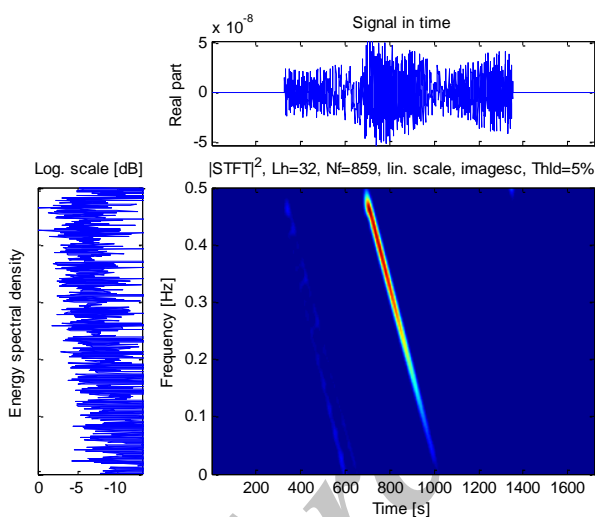
بنابراین اگر شیفت فرکانسی به اندازه  $f_a$  در رابطه (۸) ایجاد کنیم خواهیم داشت [۱۳]:

$$s_t(f_r, f_a) = A_r(f_r) \cdot A_a(f_a) \times \exp \left[ j2\pi \frac{(f_c + f_r)}{c} R(t_m(f_a + f_{ad})) \right] \times \exp \left[ -j \frac{\pi f_r^2}{k_r} \right] \times \exp[-j2\pi(f_a + f_a) t_m(f_a + f_{ad})] \quad (25)$$

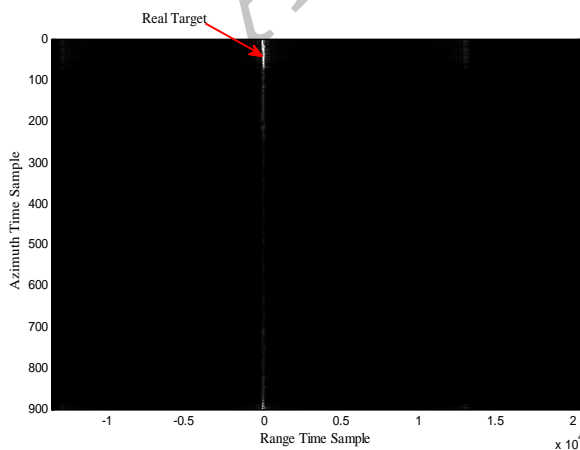
تصویر دیده نمی‌شود.

جدول (۱). پارامترهای مهم به‌کاررفته در شبیه‌سازی

واحد	مقدار	نماد	پارامتر
km	۶۰	R	برد
dB	۱	Loss	تلفات
dB	۳	NF	عدد نویز
Hz	۱۵۰۰	PRF	فرکانس تکرار پالس
GHz	۱۲	$f_c$	فرکانس حامل
MHz	۳۳	BW	پهنای باند
W	۱۰۰	$P_t$	توان فرستنده
$\mu$	۲۰	T chirp	طول چیرپ
dB	۳۰	G	گین آنتن گیرنده
km/s	(۱/۲, ۲, -۵۰)	( $v_x, v_y, v_z$ )	سرعت در راستای X و Y و Z در $t=0$
m/s <sup>2</sup>	(۲, ۹, -۰/۲)	( $a_x, a_y, a_z$ )	شتاب در راستای X و Y و Z در $t=0$



شکل (۳). اکوی بازگشتی از هدف نقطه‌ای در غیاب جمینگ



شکل (۴). تصویر هدف راداری بدون اعمال جمینگ

نمود. تنها مسئله‌ای که باقی می‌ماند، انتخاب اندازه پنجره است. باید دقت داشت که انتخاب پنجره با طول بزرگ‌تر هرچند به افزایش قدرت تفکیک فرکانسی کمک می‌کند، اما فرض ایستادن بودن قطعه‌های سیگنال را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. طیف STFT یک سیگنال به‌صورت زیر توصیف می‌شود:

$$X(m, k) = \sum_n h(m-n) x(n) \exp(-j2\pi nk/N) \quad (28)$$

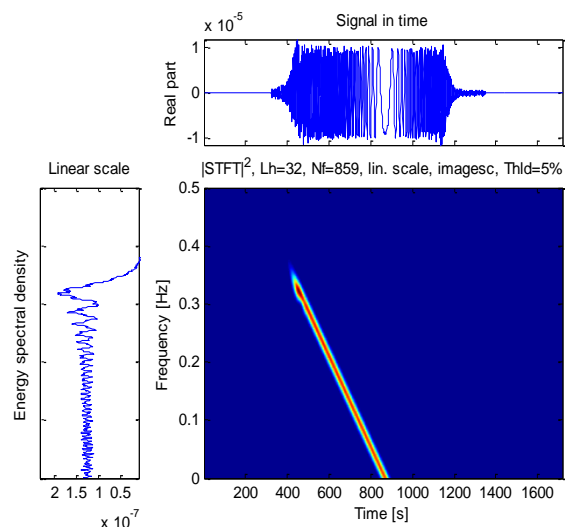
که در آن،  $m$  تعداد زمان‌های نمونه‌برداری شده،  $k$  تعداد فرکانس‌های نمونه‌برداری شده و  $N$  تعداد کل فرکانس‌های نمونه‌برداری شده است از مزایای روش زمان-فرکانس سهولت شناختن سیگنال‌های هدف است. در بخش تحلیل نتایج این مقاله از روش زمان-فرکانس مبتنی بر STFT جهت نشان دادن جزئیات کامل اکوی بازگشتی از هدف و هم‌چنین اثر جمینگ اضافه‌شده روی این اکو استفاده‌شده است.

## ۵- نتایج شبیه‌سازی

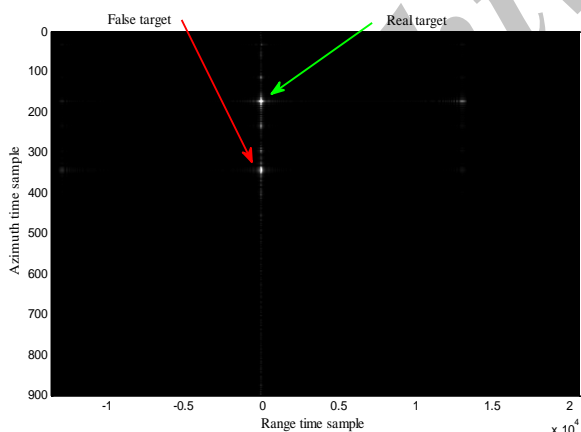
در این بخش نتایج مربوط به شبیه‌سازی اثرات جمینگ در راستای برد و سمت و هم‌چنین شبیه‌سازی مربوط به ایجاد هدف کاذب در مختصات دلخواه بیان و شرح داده‌شده است. در شکل (۳) طیف اکوی بازگشتی از هدف نقطه‌ای در نبود سیگنال‌های جمینگ با استفاده از تبدیل STFT در صفحه زمان-فرکانس نشان داده‌شده است. لازم به ذکر است که تابع پنجره استفاده‌شده در این شبیه‌سازی، پنجره همینگ<sup>۱</sup> با طول ۶۵ می‌باشد. برای نشان دادن جزئیات بیشتر، اکوی بازگشتی به‌صورت جداگانه روی محورهای زمانی و فرکانسی هم نشان داده‌شده است. همان‌طور که در شکل (۳) مشخص است، سیگنال بازگشتی از هدف در حوزه‌ی زمان یک چیرپ است که در واقع تأخیر یافته‌ی چیرپ ارسالی از رادار است و نیز در حوزه‌ی فرکانس چگالی طیف انرژی بازگشتی از هدف نقطه‌ای نشان داده‌شده است. همان‌طور که از شکل (۳) برمی‌آید چگالی طیف بازگشتی از هدف در کل پهنای باند وجود دارد و تغییرات همگن بوده و به‌صورت ناگهانی در طیف تغییری ایجاد نشده است که این موضوع بیان‌گر این است که سیگنال نویزی مزاحمی در محیط وجود ندارد. در شکل (۴) تصویر راداری مربوط به هدف نقطه‌ای بر مبنای پارامترهای راداری که در جدول (۱) آورده شده است در شرایطی که هیچ‌گونه سیگنال جمینگی وجود ندارد نمایش داده‌شده است که فقط تصویر هدف نقطه‌ای در شکل مشخص است و مطابق انتظار هیچ‌گونه هدف کاذب و یا نویزی در

<sup>1</sup> Hamming

بازگشتی از هدف واقعی در مقایسه با شکل (۳) که فقط طیف بازگشتی از هدف واقعی را نشان می‌دهد چهار شیفت در راستای محور فرکانس شده است و در راستای محور زمان بدون تغییر باقی مانده است. شیفت فرکانسی اعمال شده باعث ایجاد یک هدف ساختگی در تصویر راداری می‌گردد که در راستای سمت به اندازه‌ی متناسب با شیفت فرکانسی با هدف واقعی فاصله دارد و صحت این موضوع با استفاده از روابط (۲۶ و ۲۷) قابل اثبات است.

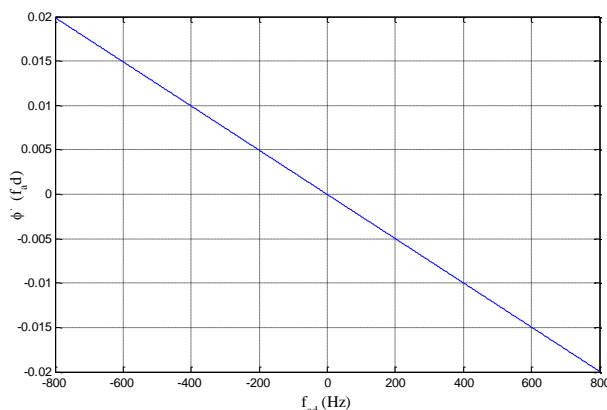


شکل (۷). اکوی بازگشتی از هدف نقطه‌ای و هدف ساختگی به وسیله شیفت فرکانس در راستای سمت

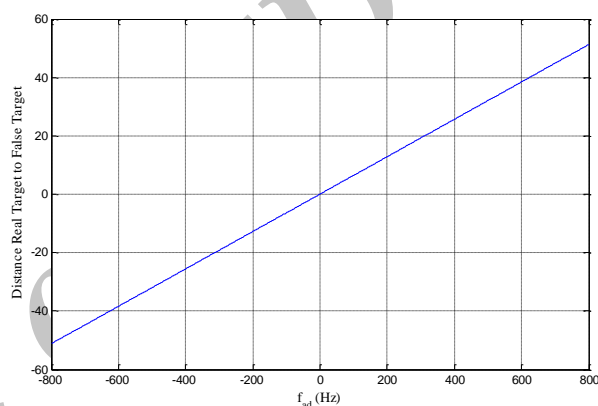


شکل (۸). تصویر هدف واقعی و هدف کاذب با فاصله در راستای سمت

در شکل (۹) نمودار فاصله بین هدف کاذب و هدف واقعی در راستای برد بر اساس تغییرات  $f_{ad}$  و با استفاده از رابطه (۲۴) رسم شده است. از این نمودار به منظور به دست آوردن میزان شیفت فرکانسی مطلوب با توجه به فاصله موردنظر بین هدف واقعی و هدف کاذب در راستای برد می‌توان استفاده کرد. شکل‌های (۱۰ و ۱۱) به ترتیب بیان‌گر طیف بازگشتی از هدف

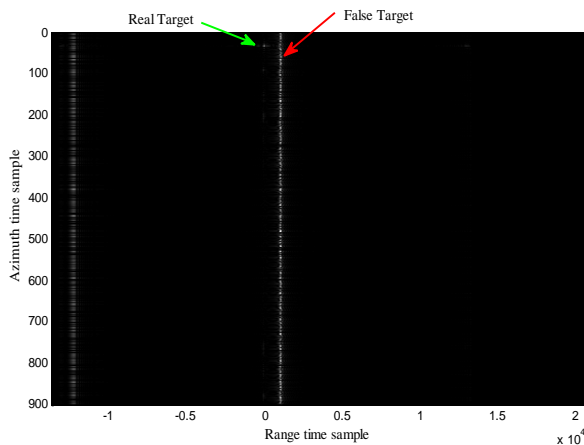


شکل (۵). نمودار  $\phi'_0(f_{ad})$  بر اساس تغییرات  $f_{ad}$



شکل (۶). نمودار فاصله بین هدف کاذب و هدف واقعی در راستای سمت بر اساس تغییرات  $f_{ad}$

در شکل (۵) نمودار  $\phi'_0(f_{ad})$  بر اساس تغییرات  $f_{ad}$  و با استفاده از رابطه (۱۳) ترسیم شده است. این نمودار در واقع اثر مقدار شیفت فرکانسی در سیگنال ارسالی از جمر به سمت هدف را نشان می‌دهد. در شکل (۶) نمودار تغییرات  $f_{ad}$  بر اساس فاصله بین هدف کاذب و هدف واقعی در راستای سمت ترسیم شده است. نمودار با توجه به فاصله‌ای که در راستای سمت بین هدف کاذب و هدف واقعی مدنظر است، شیفت فرکانسی که باید به سیگنال اعمال شود را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد هرچه شیفت فرکانسی بیشتری در راستای سمت به سیگنال اعمال شود هدف ساختگی در راستای فاصله بیشتری با هدف واقعی خواهد داشت. با استفاده از رابطه (۲۶) شیفت فرکانسی معادل ۱۰۰ Hz به سیگنال راداری اعمال شده است که نتیجه‌ی آن شکل‌های (۷ و ۸) خواهد بود که به ترتیب طیف اکوی بازگشتی و تصویر راداری را نشان می‌دهد. هدف ساختگی که با هدف واقعی در راستای سمت به اندازه ۷ m فاصله دارد در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود طیف اکوی بازگشتی از جمر به علاوه طیف



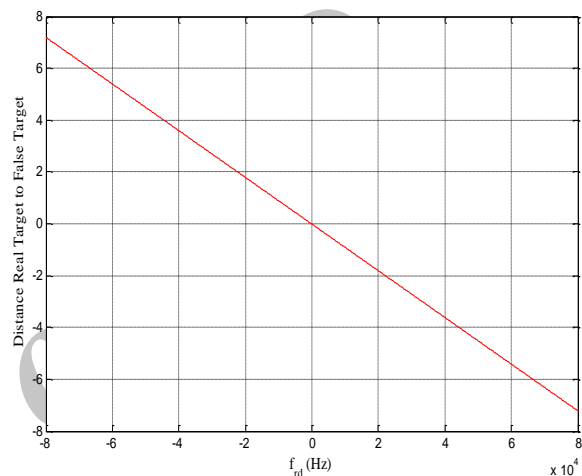
شکل (۱۱). تصویر هدف واقعی و هدف کاذب با فاصله در راستای برد

## ۶- نتیجه‌گیری

نظر به قابلیت‌هایی که سامانه تصویربرداری SAR ارائه می‌نماید، مقابله با آن‌ها و ایجاد اختلال در فرایند تصویربرداری و هدف‌یابی این سامانه می‌بایست به‌عنوان یک اولویت در برنامه پدافندی گنجانده شود.

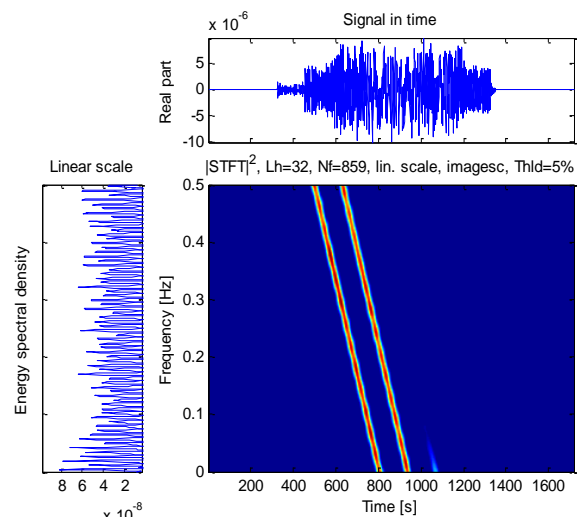
در این مقاله به بررسی الگوریتم تصویربرداری راداری برد-داپلر<sup>۱</sup> پرداخته شد و سپس با توجه به پارامترهای مربوط به مکان هدف در راستای برد و سمت به بیان روابط ریاضی هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس به منظور ایجاد هدف کاذب در محل دلخواه پرداخته شده و الگوی رفتاری جمینگ فریب در فرایند تصویربرداری استخراج گردید. همان‌طور که در روابط ریاضی نشان داده شد، عبارات متناسب با زمان آهسته، مکان هدف در راستای سمت را مشخص می‌کنند و عبارت متناسب با زمان سریع، مکان هدف در راستای برد را تعیین می‌کند. بنابراین در شبیه‌سازی‌ها تلاش شد با ایجاد تأخیر در سیگنال دریافتی از SAR مکان هدف کاذب را در مقایسه با مکان هدف واقعی در راستای برد تغییر داد و هم‌چنین با ایجاد شیفت فرکانسی در سیگنال دریافتی از SAR مکان هدف ساختگی را نسبت به مکان هدف واقعی در راستای سمت جابه‌جا کرد. نتایج شبیه‌سازی نشان داده که با استفاده از شیفت فرکانسی در تصویر راداری یک هدف کاذب ایجاد شد که در راستای سمت با هدف واقعی فاصله داشت. هم‌چنین اعمال یک تأخیر زمانی در سیگنال راداری توسط جمر، در تصویر راداری یک هدف کاذب نمایان خواهد ساخت که مطابق انتظار در راستای برد با هدف واقعی فاصله خواهد داشت.

واقعی و هدف کاذب حاصل از ایجاد جمینگ در راستای برد را نشان می‌دهد. با استفاده از رابطه (۲۳) و همان‌طور که شکل (۱۰) نشان می‌دهد با ایجاد یک شیفت فرکانسی در راستای برد در حوزه فرکانس که معادل تأخیر زمانی در حوزه زمان است موجب ایجاد یک طیف علاوه بر طیف هدف واقعی شده که هدف کاذب را در تصویر راداری مطابق شکل (۱۱) نمایش خواهد داد. در شکل (۱۱) نتایج ناشی از ایجاد تأخیر زمانی معادل  $9\mu s$  در سیگنال راداری و تصویر هدف کاذب که در راستای برد با هدف واقعی فاصله دارد را به‌وضوح نشان می‌دهد.



شکل (۹). نمودار فاصله بین هدف کاذب و هدف واقعی در راستای برد

بر اساس تغییرات  $f_{rd}$



شکل (۱۰). آکوی بازگشتی از هدف نقطه‌ای و هدف ساختگی به‌وسیله شیفت فرکانس در راستای برد



## ۶- مراجع

- [1] A. Reyvandi, "Implementation of image formation process in SAR imaging system," M. S. thesis University of Malek-Ashtar, Iran, 2012.
- [2] M. Nouri Parakestani, M. Kazerooni, and H. Heydar, "The range doppler algorithm for synthetic aperture radar moving on a ballistic trajectory," *Journal of Radar*, vol. 2, no. 3, pp. 37-48, 2014.
- [3] H. Zhao, "Simulation of Barrage-Type Jamming for Synthetic Aperture Radars," in *International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management*, 2008.
- [4] Z. Shenghua, X. Dazhuan, J. Xueming, and H. Hua, "A study on active jamming to synthetic aperture radar," in *3rd International Conference on Computational Electromagnetics and Its Applications*, Proceedings, pp. 403-406, 2004.
- [5] X. Wu, D.-H. Dai, and X.-S. Wang, "Study on SAR jamming measures," *International Conference on Radar Systems*, pp. 1-5, 2007.
- [6] L. Nan and Q. Changwen, "Research on jamming synthetic aperture radar technologies," *1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, pp. 563-566, 2007.
- [7] N. Zhang, L. Kuang, X. Shen, Q. Wan, and W. Yang, "A jamming technique against airborne SAR," *International Conference on Radar*, 2006.
- [8] H. Zhang, Y. Tang, G. Wu, and L. Sun, "SAR deceptive jamming signal simulation," *1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, pp. 61-64, 2007.
- [9] X. dong He, Y. hao Li, Z. Wang, and B. Tang, "Deceptive jamming to missile-borne SAR based on ship-borne jammer," *International Conference on Communications, Circuits and Systems*, pp. 218-221, 2013.
- [10] I. G. Cumming and F. H.-c. Wong, "Digital processing of synthetic aperture radar data," *Algorithms and Implementation*, Artech house, 2005.
- [11] Y. L. Neo, F. H. Wong, and I. G. Cumming, "Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, pp. 14-21, 2008.
- [12] Z. Wang, X. He, and B. Tang, "Imaging Algorithm of Missile-borne SAR in Diving and Squint Mode," *International Conference on Advanced Computer Science and Electronics Information*, 2013.
- [13] L. Yu-Heng, "Two Dimensional Shift-frequency Jamming on Curve Locus Missile-borne SAR," *Electronic Science and Technology*, vol. 1, p. 028, 2012.
- [14] L. Cohen, "Time-frequency analysis," *Prentice Hall PTR Englewood Cliffs, NJ*, vol. 778, 1995.

## Time Frequency Analysis of two Dimensional Shift Frequency Jamming in Image of Synthetic Aperture Radar with Diving Platform Using Passive Defense

S. Askari, M. Kazerooni\*

\*Malek-ashtar University of Technology

(Received: 02/03/2016, Accepted: 01/08/2016)

### ABSTRACT

*This paper proposed a method to create deception jamming against a SAR with diving platform. It is assumed jammer is stationary on the ground. SAR imaging, using two dimensional modulation frequency and creating false target in the desired coordinate, using the Range Doppler Algorithm and Based on the inherent relationship between time delay and frequency shift characteristics will be described. Finally this paper deduces general output form of shift frequency jamming in a SAR with diving platform. according to the simulation and using fitted expressed relationship can be conclude, if the jammer applied frequency shift radar signal, false target will distance from real target in Azimuth, and time delay causes a false target that is far away from real target in Rang dimension. From the results of this paper can be used in order to passive defense against radar threats, especially creating false target in SAR, of opposing force.*

**Keywords:** Synthetic Aperture Radar, Real Target, False Target, Jamming, Deception Jamming

---

\* Corresponding Author Email: Kazerooni@mut.ac.ir