

استخراج ویژگی از بالگرد با استفاده از پالس های بازگشتی در حوزه زمان

زینب خودکار^۱، سید محمد علوی^۲، ناصر پرهیزگار^{۳*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات فارس، ۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع) و

۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات فارس

(دریافت: ۹۲/۰۳/۲۵، پذیرش: ۹۲/۰۸/۲۶)

چکیده

امروزه با پیدایش تسلیحات پیشرفته آند هوایی، استفاده از سیستم های پدافندی مدرن همچون سیستم های تشخیص اهداف هوایی، می تواند نقش عمده ای در دفاع موفق ایفا نماید. میکرو حرکت ساختارهای چرخان اهداف راداری، در بسیاری از مواقع، به عنوان ویژگی متمایز کننده در تشخیص آنها مورد استفاده قرار می گیرد. در اختیار داشتن کتابخانه ای جامع و دقیق از اهداف مورد نظر، می تواند تأثیر زیادی در میزان عملکرد الگوریتم های استخراج ویژگی داشته باشد. از طرفی، مدل سازی بازگشتی های راداری که حاوی اطلاعاتی در مورد مشخصات ساختاری هدف باشند، امکان کنترل پارامترهای راداری و قابلیت انتخاب دلخواهانه مشخصات اهداف را فراهم می کند. در این مقاله، میکرو حرکت چرخشی نوک پره های بالگرد شناور، به عنوان ویژگی منحصر به فرد هر بالگرد، در پالس های بازگشتی از پره ها، با رزولوشن خیلی بالا مدل شده است. هرچند به کاربردن پالسی با پهنای پالس استفاده شده در این مقاله با تکنولوژی امروز مقدر نمی باشد، ولی امکان مشاهده و تحلیل پدیده میکرو حرکت پره ها را در حوزه زمان و بدون در نظر گرفتن سطح مقطع راداری آنها، فراهم می سازد. همچنین در مقاله حاضر الگوریتمی برای تخمین سرعت چرخش پره ها (V_{ROT}) با استفاده از پالس های بازگشتی به ازای چهار مدل بالگرد موجود، طراحی و معرفی شده است. با انتخاب نامناسب پارامترهای راداری همچون PRF و TOT، پالس های بازگشتی برای استفاده در الگوریتم معرفی شده جهت تخمین سرعت چرخش پره ها، مناسب نخواهند بود. بنابراین، پارامترهای راداری فوق نیز، مورد ارزیابی قرار گرفته اند.

کلید واژه ها: استخراج ویژگی، تخمین سرعت روتور، بالگرد، مدل سازی بازگشتی، میکرو حرکت.

Feature Extraction from Helicopter Using Time Domain Back Scattered Pulses

Z. Khodkar¹, S. M. Alavi, N. Parhizgar

Fars Science and Research Islamic Azad University

(Received: 15/06/2013; Accepted: 17/11/2013)

Abstract

NOWADAYS, DUE TO THE APPEARANCE OF ADVANCED WEAPONS, THE USAGE OF MODERN DEFENCE SYSTEMS SUCH AS AERIAL TARGET RECOGNITION SYSTEMS COULD PLAY A PROMINENT ROLE IN A SUCCESSFUL DEFENCE. THE MICROMOTION OF ROTOR BLADE TIPS OF RADAR TARGETS IS USED, IN MANY CASES, AS DISCRIMINANT FEATURE FOR THEIR RECOGNITION. POSSESSING A GOOD AND ACCURATE DATABASE OF TARGETS OF INTEREST CAN EXTREMELY AFFECT THE PERFORMANCE OF FEATURE EXTRACTION ALGORITHMS. BESIDES, THE MODELING OF RADAR RETURNS WHICH CONTAIN INFORMATIONS ABOUT STRUCTURAL PROPERTIES OF THE TARGETS CAN BE A USEFUL TOOL. IN THIS PAPER, THE ROTATIONAL MICRO-MOTIONS OF THE HOVERING HELICOPTER MAIN ROTOR BLADE TIPS ARE MODELED AS INDEPENDENT FEATURES OF EACH HELICOPTER IN BACKSCATTERED PULSES WITH HIGH RANGE RESOLUTION ABILITY. ALTHOUGH, THE IMPLEMENTATION OF A PULSE AS NARROW AS THE PULSE USED IN THIS PAPER IS NOT REALIZABLE WITH AVAILABLE TECHNOLOGIES, IT PROVIDES TIME DOMAIN MODELING OF BLADE'S MICRO-MOTIONS WITHOUT TAKING THEIR RADAR CROSS SECTIONS INTO ACCOUNT. IN THIS PAPER, AN ALGORITHM IS ALSO DESIGNED AND PRESENTED FOR ESTIMATING THE ROTATIONAL VELOCITY OF MAIN ROTOR BLADE TIPS (I.E. ROTOR VELOCITY ESTIMATION). WHEN THE RADAR PARAMETERS SUCH AS PULSE REPETITION FREQUENCY (PRF) AND TIME ON TARGET (TOT) ARE IMPROPERLY ALLOCATED, THE BACKSCATTERED PULSES ARE NOT SUITABLE TO BE USED IN FEATURE EXTRACTION ALGORITHM. HENCE, ABOVE MENTIONED RADAR PARAMETERS ARE ALSO EVALUATED.

Keywords: Feature Extraction, Helicopter, Rotor Velocity Estimation, Echo Modeling, Micro-Motion.

* Corresponding Author E-Mail: parhizgar@fsriau.ac.ir

۱. مقدمه

استفاده از مدولاسیون ملخ یا پره روتور برای تشخیص هدف خیلی پیش از این معرفی و پیشنهاد شده، چگونگی استخراج اطلاعات حرکتی هدف از شکل سیگنال دریافتی و چگونگی توصیف شکل سیگنال برگشتی از اهداف بر اساس تغییرات فرکانسی اینگونه مدولاسیون‌ها در طول زمان استفاده از شکل سیگنال برگشتی رادار برای شناسایی اهداف از جمله موضوعات جدیدی است که مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است [۹]. به‌عنوان مثال، محققین متعددی مدل سیگنال بازگشتی از پره‌های بالگرد را با استفاده از روابط ریاضی معرفی کرده‌اند [۶، ۱۰ و ۱۱]. در مقاله‌ای دیگر، بازگشتی‌های ناشی از ساختار چرخان هاب در روتور اصلی بالگرد مورد بررسی قرار گرفته و مدل شده است [۱۲]. همچنین، نایبی و حق‌شناس [۱۳]، به‌منظور آشکارسازی بازگشتی‌های ناشی از پره‌های بالگرد، روش نوینی را ارائه نموده و عملکرد آن را ارزیابی کرده‌اند. چنانچه پارامترهای هدف با دقت کافی استخراج شده باشند، تشخیص و کلاسه‌بندی آنها نیز به‌گونه‌ای مناسب انجام خواهد شد [۱۴]. از طرفی دست‌یابی به عملکرد مناسب در الگوریتم‌های دسته‌بندی اهداف، مستلزم داشتن کتابخانه جامع و دقیق از بازگشتی‌های اهداف مورد نظر است.

با مدل‌سازی و تولید داده‌های راداری، امکان تغییر پارامترهای راداری و مشخصات اهداف بسیار راحت‌تر و سریع‌تر انجام می‌پذیرد. حتی می‌توان بازگشتی‌های اهدافی که در اختیار نیستند را شبیه‌سازی و تولید نمود. در این میان انتخاب مناسب پارامترهای راداری از قبیل PRF^۲ و TOT^۳ به‌منظور استخراج اطلاعات مفید و دقیق از سیگنال‌های دریافتی می‌تواند نقش بسزایی در این زمینه ایفا نماید. تاکنون مسئله انتخاب PRF غالباً در رفع ابهام سرعت و برد مورد مطالعه قرار گرفته و یا ترکیب چند PRF به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که ابهام سرعت و برد و مسئله ghosting برطرف شده و در نهایت عملکرد رادار بهینه شود [۱۷-۱۵].

در این مقاله، میکروحرکت پره‌های بالگرد با هدف استخراج ویژگی از بالگردهایی که به‌طور شناور در دید رادار قرار گرفته‌اند، به‌عنوان ویژگی متمایز کننده بالگردها مورد مطالعه قرار گرفته است بنابراین، با فرض ارسال ایمپالس‌های بسیار باریک، پالس‌های بازگشتی از نوک پره‌ها با رزولوشن فاصله بالا، به ازای چهار مدل بالگرد متفاوت مدل شده است. تفاوت اصلی بالگردهای انتخاب شده، در تعداد، طول و سرعت چرخش پره‌های آنهاست و بنابراین استخراج ویژگی بر اساس پارامتر سرعت نوک پره‌ها صورت گرفته و الگوریتمی به این منظور طراحی و ارائه شده است. از آنجایی که الگوریتم استخراج ویژگی طرحی شده در این مقاله به پالس‌های بازگشتی اعمال می‌شود، انتخاب مناسب پارامترهای PRF و TOT می‌تواند در دقت تخمین نرخ چرخش روتور بالگرد تأثیر بسزایی

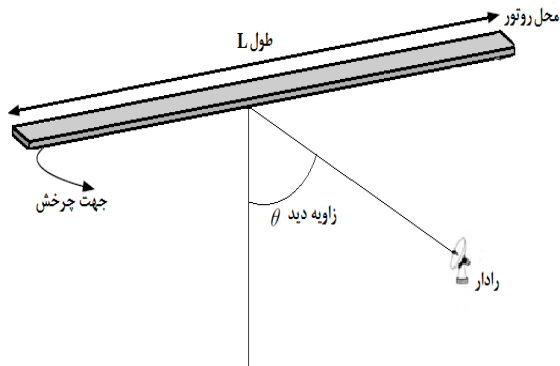
مسئله تشخیص و شناسایی اهداف راداری به‌عنوان یکی از موضوعات مهم، به‌ویژه در دهه‌های اخیر مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است [۳-۱]. غافل‌گیری سیستم‌های پدافندی در برابر پرنده‌های تهاجمی، مناطق حیاتی و حساس را به هدف‌های آسان و قابل دسترس برای آنها تبدیل خواهد نمود. استفاده از روش‌هایی که تا حد امکان ماهیت اهداف دشمن را آشکار کنند، می‌تواند به قابلیت‌های سیستم‌های دفاعی موجود بیافزاید و مقاومت آنها را در برابر تهاجمات هوایی افزایش دهد بنابراین، استفاده از روش‌هایی که تا حد امکان ماهیت اهداف دشمن را آشکار کنند، امری اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین استفاده از سیستم‌هایی راداری هوشمند همچون سیستم‌های تشخیص اهداف هوایی، می‌تواند نقش بسزایی در پدافند هوایی موفق ایفا نماید. سیگنال‌های برگشتی از هر هدف شامل اطلاعاتی است که منحصر به همان هدف است. چنانچه اجزاء موجود در هدف در حال چرخش باشند، سیگنال برگشتی از هدف علاوه بر اینکه دچار یک شیفت داپلر اصلی ناشی از حرکت بدنه می‌شود، شامل مدولاسیون‌های باند کناری متناوب غیرخطی خواهد بود که در اصطلاح به آن اثر میکرو داپلر گفته می‌شود [۴]. این حرکات که با عنوان میکرو حرکت‌ها از آنها یاد می‌شود ممکن است ناشی از یک ملخ چرخان در یک هواپیمای ملخی با بال ثابت، پره‌های چرخان یک بالگرد، یک آنتن چرخان، بال زدن پرندگان، نفر پیاده با دست‌ها و پاها متحرک و مواردی از این قبیل باشد [۷-۵]. از این حرکات چرخشی و نوسانی که برای هر نوع هدف، منحصر به همان هدف می‌باشد می‌توان به‌عنوان ویژگی‌های متمایز کننده اهداف در مسائل شناسایی و تشخیص اهداف راداری استفاده نمود [۴ و ۸]. مدل کردن این سیگنال‌ها با استفاده از توابع ریاضی و نرم‌افزارهای کامپیوتری امکان مانور بیشتر بر روی مدل اهداف را فراهم می‌سازد. به‌عنوان مثال، حتی می‌توان سیگنال‌های برگشتی از هر نوع هدف را با در نظر گرفتن شکل فیزیکی و دینامیک حرکتی آن، با این روش به‌دست آورد.

پدیده میکرو داپلر اولین بار در سیستم‌های راداری همدوس لیزری^۱ معرفی شد [۹]. در واقع در یک سیستم همدوس، میکرو حرکت‌ها فاز سیگنال برگشتی را تا حدودی تحت تأثیر قرار می‌دهند و در اطراف شیفت داپلر مرکزی مربوط به فرکانس حامل رادار، شیفت‌های داپلر باند کناری ایجاد می‌کنند. این مدولاسیون‌ها شامل فرکانس‌های هارمونیک هستند که بر حسب فرکانس حامل، نرخ چرخش روتور و زاویه بین جهت چرخش پره‌ها و پرتوی راداری وارد بر هدف تعریف می‌شوند. همچنین، مدولاسیون‌های فرکانسی امکان تعیین مشخصات حرکتی بخش‌های چرخان اهداف از قبیل پره‌های بالگرد و یا ملخ هواپیما را فراهم می‌کند. چنانچه اولین رادارهای ردگیر در سال‌های ۱۹۳۰ برای آشکارسازی مدولاسیون ناشی از ملخ هواپیما مورد استفاده قرار گرفتند [۱۰]. با وجود اینکه

^۲ Pulse Repetition Frequency^۳ Time on Target^۱ Coherent

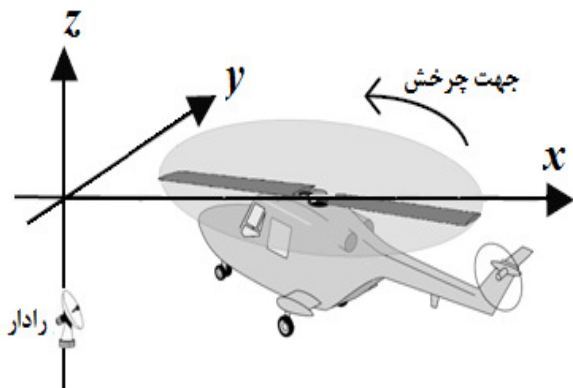
مربوط می‌شوند را می‌توان به عنوان ویژگی هدف در مسائل کلاسه‌بندی مورد استفاده قرار داد. به عنوان مثال، فلاش‌های ناشی از پره‌های بالگرد بسته به اینکه تعداد پره‌های بالگرد، زوج یا فرد باشد متفاوت است و این می‌تواند به‌عنوان یکی از ویژگی‌های تفکیک کننده مورد استفاده قرار بگیرد.

پره‌های موجود بر روی روتور اصلی نازک و بلند هستند، بنابراین هر پره را می‌توان به صورت یک صفحه با قطر نازک و طول بلند مطابق شکل (۱) مدل کرده و تعامل سیگنال راداری را با آن بررسی نمود [۱۹].



شکل ۱. پره بالگرد در حال چرخش در زاویه دید θ

با توجه به اینکه هدف مقاله حاضر، مطالعه بر روی پالس‌های برگشتی از هرکدام از پره‌ها می‌باشد بنابراین، لبه هرکدام از پره‌ها به‌عنوان نقطه‌ای چرخان حول مرکز روتور در نظر گرفته شده و پالس‌های برگشتی از آنها مدل شده است. دستگاه مختصات سه‌بعدی نشان داده شده در شکل (۲)، یک بالگرد شناور^۱ را در صفحه $x-y$ نمایش می‌دهد. رادار در مختصات (x_r, y_r, z_r) واقع شده و پرتو آنتن خود را بر روی بالگردی که مرکز روتور آن در مختصات (x_c, y_c, z_c) می‌باشد انداخته است. پره‌ها به طول L بوده و با فرکانس زاویه‌ای ثابت ω_{rot} در حال چرخش هستند.



شکل ۲. بالگرد شناور و رادار در دستگاه مختصات سه بعدی

داشته باشد. بخش دوم، مدل پالس‌های دریافتی از نوک پره‌های بالگرد را با استفاده از روابط ریاضی ارائه می‌کند. همچنین، الگوریتم تولید پالس‌ها، ارائه شده است. در بخش سوم، پارامترهایی همچون PRF و TOT به‌عنوان دو پارامتر مهم در میزان دقت پالس‌های بازگشتی، ارزیابی شده و حد بالای سرعت چرخش آنتن رادار (ω_r) تعیین شده است. در ادامه الگوریتمی به‌منظور تخمین سرعت چرخش روتور (v_{rot}) بالگرد طراحی شده و ساختار آن، به تفصیل، شرح داده شده است. در بخش چهارم، الگوریتم‌های ارائه شده در بخش‌های سوم و چهارم به‌ازای چهار مدل بالگرد شناخته شده SH-3 SEA KING، APACHE AH-65، H-5 SIKORSKY و CH-53 SEA STALLION شبیه‌سازی شده و نتایج آنها ارائه شده است. همچنین v_{rot} هرکدام از بالگردهای فوق با استفاده از الگوریتم معرفی شده در بخش چهارم، با حداقل دقت $1/26 \text{ m/s}$ تخمین زده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها مبین این واقعیت است که استخراج ویژگی مناسب از پره‌های چرخان، به دقت داده‌های مورد استفاده بستگی شدیدی دارد. بنابراین، چنانچه ω_r از مقدار تعیین شده در محاسبات تجاوز کند، سیگنال‌های بازگشتی برای اندازه‌گیری v_{rot} با استفاده از الگوریتم معرفی شده در این مقاله، مناسب نخواهند بود و این موضوع در نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌ها در جدول (۲) ارائه شده است.

۲. مدل پالس‌های بازگشتی

سیگنال برگشتی از بالگرد به شدت تحت تأثیر دینامیک و بخش‌های چرخان آن است [۱۸ و ۱۹]. بنابراین در ادامه، به بررسی دینامیک بالگرد پرداخته شده و برگشتی‌های راداری آن تحلیل و مدل‌سازی شده است. هر بالگرد از سه مرکز پراکندگی تشکیل شده که عبارتند از بدنه، روتور اصلی و روتور کوچک موجود در دم بالگرد [۱۱]. از آنجایی که جنس پره‌های بالگرد غالباً از فلز و یا یک ماده کامپوزیتی است، برگشتی راداری قدرتمندی تولید می‌کند، به‌طوری که با عمود شدن پرتوی رادار به سطح پره، یک قله در سیگنال دریافتی مشاهده می‌شود که به فلاش پره موسوم می‌باشد. در حالت کلی، سیگنال برگشتی از هدف به سمت رادار را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود [۲۰]:

$$X \neq (A) \exp \left\{ 2 \left[T + \frac{2R(T)}{c} \right] \right\} \quad (1)$$

که در آن، c سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی، f_c فرکانس سیگنال ارسالی و $R(t)$ برد اجزاء مورد بررسی هدف است. $A(t)$ نیز پوش سیگنال برگشتی است و در واقع همان سیگنال دریافتی است که دچار مدولاسیون دامنه شده است. برخلاف مدل‌های سوئرلینگ برگشتی‌های روتور بالگرد به صورت توابعی یقینی هستند و به فرکانس چرخش روتور وابسته می‌باشد [۲۱ و ۲۲]. بخش‌هایی از سیگنال برگشتی که به لبه‌های دور شونده و نزدیک شونده پره‌ها

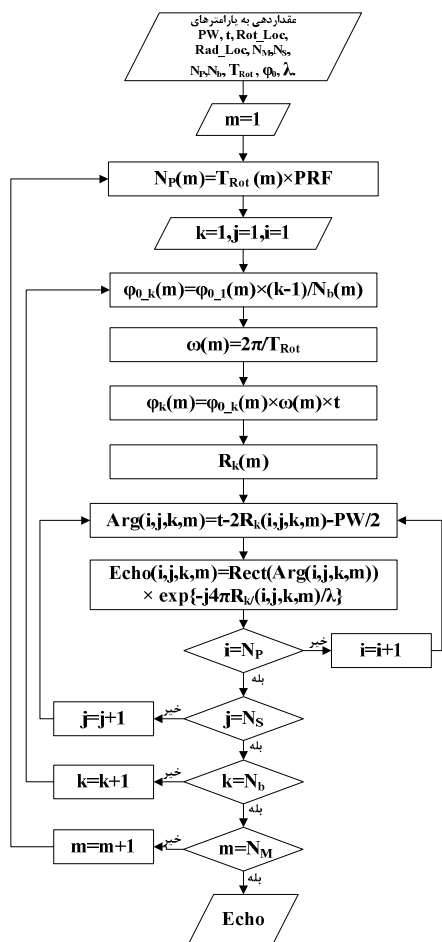
¹ Hovering

رادار که با $R_k(t)$ نشان داده شده مطابق با رابطه زیر بر حسب مشخصات بالگرد تعریف شده است [۱۰]:

$$R_k(T) = B + A \cos(\Phi_0 + 2k\pi/N) \quad (3)$$

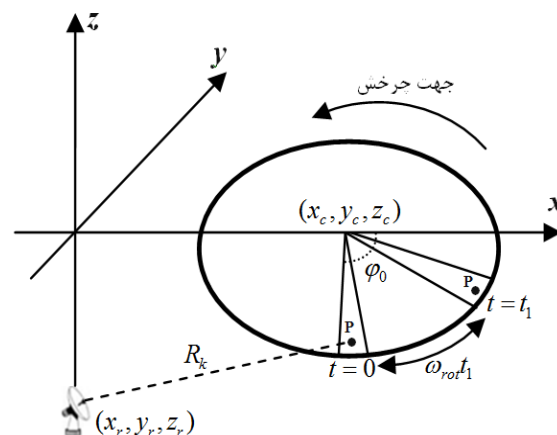
FOR $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$

در رابطه فوق a و b به ترتیب برابر با $b = \sqrt{x_c^2 + z_c^2}$ و $a = x_c / \sqrt{x_c^2 + z_c^2}$ می‌باشند. همان‌طور که در بالا نیز به آن اشاره شد، در مسائل تشخیص اهداف راداری، می‌توان از داده‌هایی که حاوی اطلاعات فلاش پرها هستند استفاده نمود و الگوریتم‌های استخراج ویژگی را بر روی آنها اعمال کرد. در مقاله حاضر، اندازه پالس‌های بازگشتی از نوک پرها با استفاده از الگوریتمی که در شکل (۴) ارائه شده است شبیه‌سازی و تولید شده است. پارامترهایی که در فلوجارت شکل (۴) استفاده شده‌اند، $t, PW, Rot_Loc, Rad_Loc, N_b, N_p, N_s, N_m$ هستند که به ترتیب معرف پهنای پالس، زمان، مختصات موقعیت مرکز روتور بالگرد، مختصات موقعیت رادار، تعداد مدل‌های بالگرد، تعداد نمونه برداری‌ها در هر پالس بازگشتی، تعداد پالس‌های بازگشتی، تعداد پرها می‌باشند. همچنین $0 \leq k < N$ بیانگر فاز اولیه در پره k -ام است و $R_k(t)$ مطابق با رابطه (۳) محاسبه می‌شود.



شکل ۴. الگوریتم تولید پالس‌های بازگشتی از پره‌های چهار مدل بالگرد در طول یک دور چرخش روتور اصلی هر کدام از آنها

از آنجایی که در عمل، بالگردهایی با تعداد ۲ پره یا بیشتر به‌عنوان هدف در دید رادار قرار می‌گیرند، با فرض اینکه تعداد پره‌های موجود بر روی روتور اصلی بالگرد برابر با N باشد، N زاویه‌ی چرخش اولیه به‌صورت $\varphi_k(t) = \varphi_0 + \frac{2k\pi}{N}$, for $k = 0, 1, \dots, N-1$ وجود خواهد داشت، که در آن φ_k ، زاویه پره k ام با محور x ها است. نمایش مکان هندسی نوک پرها و زاویه φ متناظر با آن در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. نمایش مکان هندسی نوک پرها، که با نقطه P نشان داده شده است و زاویه φ متناظر با آن

همان‌طور که در شکل (۳) نیز نشان داده شده است، با در نظر گرفتن نقطه P بر روی لبه پره بالگرد، پالس‌های بازگشتی از آنها را در باند پایه می‌توان به صورت زیر مدل نمود [۸]:

$$X_{\Sigma}(T) = \sum_{N=1}^{N_p} \sum_{k=1}^N \text{RECT} \left(T - \frac{2R_k(T)}{C} \right) \times \exp \left\{ -j 2 \frac{2R_k(T)}{C} \right\} \quad (2)$$

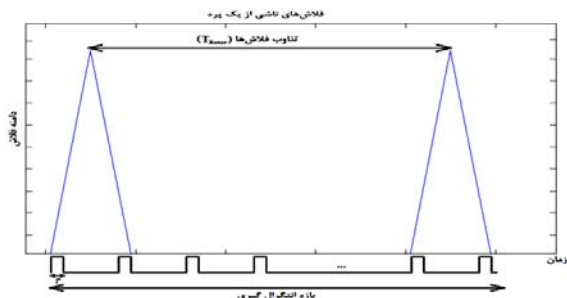
که در آن، N_p تعداد پالس‌های برگشتی در مدت زمان مشاهده هدف، T_{PRP} تناوب ارسال پالس‌های راداری، λ طول موج سیگنال ارسالی رادار و جمله $\text{rect}(\cdot)$ نیز بیانگر تابع پالس مستطیلی است که مقدار آن در بازه $0 < t < T$ برابر با ۱ است که در آن T عرض پالس ارسالی رادار می‌باشد. $R_k(t)$ نیز فاصله بین رادار و k امین پره در زمان t است و طبق رابطه (۳) تعریف می‌شود. از آنجایی که پره‌های روتور اصلی خیلی بزرگ‌تر از پره‌های روتور عقبی می‌باشند، در این مقاله از برگشتی‌های ناشی از پره‌های عقبی صرف‌نظر شده است. زاویه اولیه یکی از پرها با محور x ها در لحظه $t=t_0$ برابر با $\varphi_0(t)$ در نظر گرفته شده و با توجه به اینکه فرکانس چرخش پرها ω_{rot} رادیان در ثانیه می‌باشد، تغییرات فاز در لحظه t نسبت به حالت اولیه $t=t_0$ به اندازه $\Delta\varphi = \omega_{rot} \Delta t$ خواهد بود. زوایای بقیه پرها نیز برحسب φ_0 و $k = 0, 1, \dots, N-1$ محاسبه شده است. با چرخش پرها، مختصات نقطه P نیز تغییر می‌کند و برد آن تا

داده شده است. با توضیحات فوق می‌توان نتیجه گرفت که در صورت دریافت N_p پالس در یک بازه تجمیع پالس، شرط لازم برای مشاهده یک دور چرخش کامل پره‌ها به صورت زیر است:

$$N_p \geq T_{ROT}/T_{PRP} \quad (۴)$$

که در آن، T_{ROT} تناوب چرخش روتور اصلی و T_{PRP} تناوب پالس‌های ارسالی رادار و متناسب با PRF انتخابی می‌باشد.

از رابطه (۴) می‌توان استنباط نمود انتخاب PRF تأثیر مستقیمی بر تعداد پالس‌های دریافتی دارد و با زیاد شدن PRF تعداد نمونه‌های موجود از پالس‌های بازگشتی بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر با توجه به اینکه در بسیاری از رادارها، آنتن رادار در حال چرخش می‌باشد، لازم است سرعت چرخش آنتن رادار و تعداد پالس قابل دریافت توسط آنتن، با حداقل N_p به دست آمده در رابطه (۴) نیز متناسب باشند.



شکل ۵. بازگشتی‌های ناشی از یک دور چرخش کامل یک پره در یک بازه تجمیع پالس

با فرض اینکه آنتن رادار با فرکانس زاویه‌ای ω_p دور در دقیقه با پهنا بی‌نیم نصف توان θ_{3dB} در حال چرخش باشد، رابطه زیر برقرار است [۲۴]:

$$R = \frac{3DB \cdot PRF}{6N_p} \quad (۵)$$

بنابراین می‌توان به منظور دریافت تعداد پالس کافی از پره‌ها در یک بار اسکن هدف، شرط زیر را با جایگذاری رابطه (۴) در رابطه (۵) تعریف نمود:

$$R \leq \frac{3DB}{6T_{ROT}} \quad (۶)$$

بنابراین، با تنظیم پهنا پرتو و سرعت چرخش آنتن رادار می‌توان نمونه برداری مناسبی از فلاش‌ها داشت. از آنجایی که روتور اصلی بالگردهای مختلف با سرعت‌های متفاوتی می‌چرخند، طبق رابطه (۴) حداقل تعداد پالس‌های بازگشتی مورد نیاز برای مشاهده یک دور چرخش کامل پره‌های هر کدام از آنها با دیگری متفاوت است. در واقع، سرعت چرخش آنتن رادار، (ω_p) ، می‌بایست به گونه‌ای انتخاب شود که حداقل تعداد پالس‌های دریافتی مطابق با رابطه (۴) باشد. انتخاب نامناسب پارامتر (ω_p) ، موجب می‌شود پالس‌های بازگشتی، اطلاعات مربوط به سرعت چرخش پره‌ها را از دست

از آنجایی که نمونه برداری از سیگنال بازگشتی در تمامی نقاط بین دو PRF بار پردازشی سنگینی را به سیستم تحمیل می‌کند، می‌توان یک پنجره در نظر گرفت و تعداد محدودی از پالس‌های بازگشتی را نمونه برداری کرد. طول این پنجره با توجه به پهنا پالس ارسالی رادار تغییر می‌کند. به عنوان مثال هرچه پهنا پالس ارسالی بیشتر باشد، تعداد نمونه‌های دریافتی در حوزه زمان توزیع بیشتری پیدا می‌کنند و طول پنجره مورد نیاز افزایش می‌یابد.

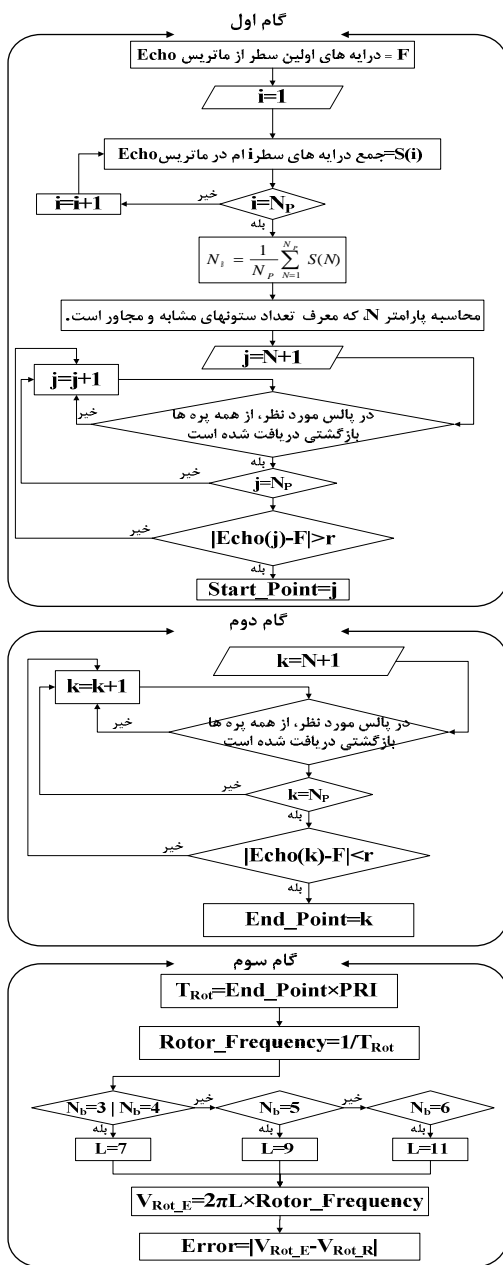
میزان دقت رادار در آشکارسازی نوک پره‌ها، می‌تواند نقش بسزایی در بهبود عملکرد الگوریتم‌هایی که در آینده بر روی این سیگنال‌ها اعمال می‌شوند ایفا کند. این مسئله در بخش سوم و چهارم، به طور مبسوط مورد بررسی قرار گرفته است.

۳. انتخاب پارامترهای راداری

برای دریافت بازگشتی دقیق که در بردارنده اطلاعات هدف باشد، انتخاب پارامترهای راداری صحیح یکی از ملزومات است. در این مقاله، پارامترهای راداری مناسب به منظور استخراج سرعت چرخش روتور اصلی بالگرد و تعداد پره‌های آن محاسبه شده و محدودیت‌های موجود در انتخاب این پارامترها مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور دریافت پالس بازگشتی دقیق از پره‌های بالگرد، فرکانس تکرار پالس‌ها (PRF) و زمان مشاهده هدف (TOT) از جمله مشخصاتی هستند که می‌بایست با در نظر گرفتن ملاحظات انتخاب شوند. در واقع انتخاب صحیح این پارامترها موجب می‌شود سیگنال بازگشتی به درستی معرف مدل هدف و مشخصات بالگرد باشد.

از آنجایی که عوامل متعددی در انتخاب PRF دخیل هستند، برای انتخاب PRF مناسب، لازم است طراح رادار بین مقادیر مختلف یک مصالحه در نظر بگیرد. به عنوان مثال، مزیت اصلی رادارهای PRF بالا، قابلیت آنها در آشکارسازی اهدافی است که سرعت‌های نزدیک به هم دارند و سرعت آنها در کلاترهای لوب فرعی می‌افتد، در حالی که در این گونه موارد، برخلاف رادارهای PRF پایین، آشکارسازی برد به شدت دچار ابهام می‌شود [۱۸]. بنابراین در مواقعی که هدف دارای پره‌هایی باشد که با سرعت زیاد در حال چرخش هستند، PRF های به نسبت بالا مناسب‌تر خواهند بود.

با فرض اینکه روتور بالگرد با نرخ f_{ROT} دور در ثانیه بچرخد، فرکانس چرخش آن برابر با f_{ROT} هر تزی می‌شود. سرعت شعاعی نوک هر پره را می‌توان با استفاده از رابطه $v_{ROT} = 2\pi L f_{ROT}$ به دست آورد. این سرعت می‌بایست کمتر از سرعت صوت باشد و در اغلب بالگردها در محدوده‌ای بین ۲۵۰-۳۰۰ m/s می‌باشد [۲۳]. برای استخراج سرعت چرخش روتور اصلی بالگرد، می‌بایست حداقل یک دور چرخش کامل هر کدام از پره‌ها، در بازه تجمیع پالس‌های بازگشتی (T_i) ، اتفاق افتاده باشد. به عبارت دیگر نیاز است T_i از تناوب تکرار فلاش‌ها بزرگ‌تر باشد. در شکل (۵)، فلاش‌های ناشی از یک دور کامل چرخش پره به همراه بازه تجمیع پالس متناظر با آن نشان



شکل ۶. الگوریتم تخمین تعداد و سرعت پره‌های چهار مدل بالگرد

۴. شبیه‌سازی

هر بالگرد دارای سرعت چرخش روتور ثابت و مشخصی است و تغییر سرعت و فرود و فراز بالگردها با تغییر حالت دینامیکی پره‌های آنها صورت می‌گیرد [۲۲]. در نتیجه می‌توان با تخمین تعداد پره‌ها و سرعت چرخش روتور آنها، بالگردها را تا حدودی از یکدیگر شناسایی نمود [۹]. این بخش در دو قسمت سازماندهی شده است. در بخش ۴-۱، پالس‌های بازگشتی از نوک پره‌های چهار مدل بالگرد مختلف، به‌ازای پارامترهای راداری یکسان، تولید و شبیه‌سازی شده است. در بخش ۴-۲، پالس بازگشتی از نوک پره‌ها به‌ازای TOT‌های مختلف شبیه‌سازی شده و دقت تخمین سرعت چرخش

بدهند و بنابراین الگوریتم استخراج سرعت پره بالگردها با مشکل مواجه خواهد شد. در مقاله حاضر، ابتدا پالس‌های بازگشتی از پره‌های چهار مدل بالگرد بر اساس الگوریتم ارائه شده در شکل (۴) تولید شده و سپس نرخ چرخش پره‌های هرکدام از بالگردها، با استفاده از الگوریتم نشان داده شده در شکل (۶) از روی پالس‌های بازگشتی استخراج شده است.

الگوریتم ارائه شده در شکل (۶)، شامل سه بخش اصلی است. در گام اول، پس از مشخص شدن فازهای مربوط به اولین پالس‌های دریافتی، یک همسایگی r حول مقادیر این فازها در نظر گرفته می‌شود. تعداد پره‌های بالگرد نیز بر حسب میانگین جمع دامنه بازگشتی‌های موجود در هر پالس، با دقت بالایی تخمین زده می‌شود. سپس در گام دوم، نمونه‌هایی که فاصله آنها از اولین دریافتی بیشتر از r است بررسی شده و اولین نمونه‌ای که اختلاف فاز آن در تمامی لحظات با اولین پالس کمتر از r است، به‌عنوان آخرین نمونه مربوط به یک دور چرخش کامل روتور، انتخاب می‌شود. در گام سوم، با استفاده از مدت زمان یک دور چرخش روتور و طول پره متناظر با تعداد پره به‌دست آمده، سرعت نوک پره‌ها تخمین زده می‌شود. مقادیر مربوط به پارامترهای استفاده شده در الگوریتم‌های شکل‌های (۴) و (۶)، در جدول (۱) ارائه شده است.

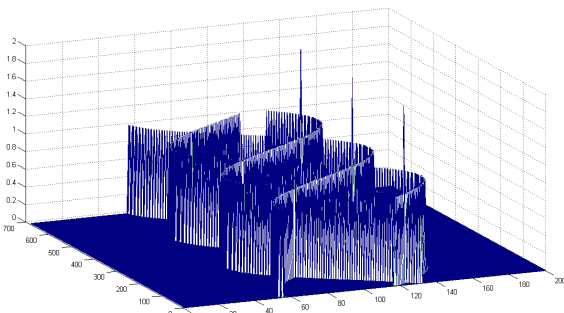
در جدول (۱)، N بیانگر تعداد پره‌ها، R قطر روتور اصلی (برحسب متر)، L طول تقریبی پره‌ها (برحسب متر)، $V_{Rot,R}$ سرعت واقعی روتور (برحسب متر بر ثانیه)، $V_{Rot,E}$ سرعت تخمینی روتور (برحسب متر بر ثانیه) و err خطای تخمین (برحسب متر بر ثانیه) است. لازم به ذکر است که در مقاله حاضر، پهنای پالس ارسالی برابر با ۱ ns در نظر گرفته شده است. با وجود اینکه چنین پهنای پالسی فعلاً در عمل استفاده نمی‌شود، ولی این انتخاب این امکان را فراهم می‌کند که پدیده میکروحرکت پره‌های بالگرد و تأثیر آن بر روی پالس‌های دریافتی به‌خوبی در حوزه زمان قابل تحلیل باشد. حداکثر نرخ چرخش آنتن رادار و حداقل N_p متناظر با آن برای چند مدل مختلف بالگرد، در بخش ۴، محاسبه و شبیه‌سازی شده و نتایج آنها ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مربوط به هرکدام از بالگردها و مقادیر V_{Rot} تخمین زده شده توسط الگوریتم شکل (۶)

مدل بالگرد	H-5 SIKORSKY	AH-64 APACHE	SH-3 SEA KING	CH-53 SEA STALLION	N
N	۳	۴	۵	۶	
R	۱۴/۶۳	۱۴/۶۹	۱۸/۹۲	۲۲/۰۴	
L	۷	۷	۹	۱۱	
$V_{Rot,R}$	۲۵۶/۵۶۳۴	۲۲۱/۲۸۴۸	۲۲۰/۹۸	۲۰۶/۱۹۳۲	
$V_{Rot,E}$	۲۵۶/۶۶۳۱	۲۲۱/۴۲۴۵	۲۲۱/۴۲۶۵	۲۰۸/۸۸۰۳	
err	۰/۰۶۷۶	۰/۱۳۹۷	۰/۴۴۶۵	۰/۶۱۱۶	

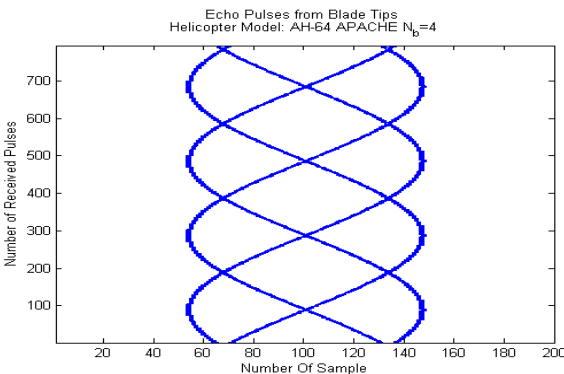
شکل (۷) پالس‌های بازگشتی از پره‌های بالگرد ۳ پره‌ای H-5 را نشان می‌دهد. تعداد سینوسی‌هایی که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، بیانگر تعداد پره‌ها می‌باشد و الگوریتم شکل (۶) با استفاده از همین مطلب، تعداد پره‌ها را تخمین زده است. این بازگشتی، به‌ازای PRF معادل ۴k و در مدت یک دور چرخش کامل هر پره بالگرد H-5 شبیه‌سازی شده است.

شکل (۸)، همان بازگشتی‌های شبیه‌سازی شده در شکل (۷) می‌باشد با این تفاوت که در سه بعد رسم شده و دامنه‌های بازگشتی‌ها در آن قابل مشاهده می‌باشد. در برخی از لحظات، بازگشتی‌هایی با دامنه ۲ مشاهده می‌شود. این بازگشتی‌ها به‌دلیل جمع شدن بازگشتی‌های ناشی از دو پره‌ای است که در یک لحظه برد یکسانی داشته‌اند و بنابراین فاز آنها در پالس بازگشتی برابر شده است.



شکل ۸. بازگشتی‌های پره‌های مدل H-5 در سه بعد

شکل (۹)، پالس‌های بازگشتی از پره‌های بالگرد ۴ پره‌ای AH-64 را نشان می‌دهد. تعداد سینوسی‌هایی که در این شکل مشاهده می‌شود نیز برابر با تعداد پره‌هاست. این بازگشتی، به‌ازای PRF معادل ۴k و در مدت یک دور چرخش کامل هر پره بالگرد AH-64 شبیه‌سازی شده است.



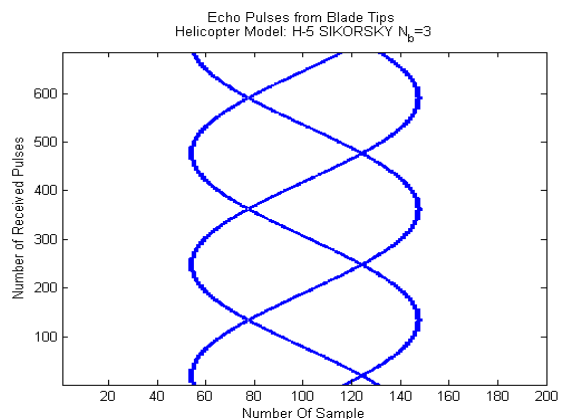
شکل ۹. بازگشتی‌های پره‌های مدل AH-64

شکل (۱۰) دامنه بازگشتی‌های شبیه‌سازی شده در شکل (۹) را در سه بعد نشان می‌دهد. در این حالت، به‌دلیل بیشتر شدن تعداد پره‌ها، تعداد قله‌های با دامنه ۲، نسبت به شکل (۸) بیشتر شده است.

روتور، با استفاده از الگوریتم نشان داده شده در شکل (۶)، به‌ازای پارامترهای فوق مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این بخش، با انتخاب عرض پالس ارسالی ۱ ns، رزولوشن فاصله بسیار زیادی به‌دست آمده است. هرچند استفاده از پالس ارسالی با این پهنا و توان قله مناسب جهت حصول بردهای مناسب در کاربردهای عملیاتی در حال حاضر با تکنولوژی امروز مقدور نمی‌باشد، ولی انتخاب چنین پهنای پالسی امکان مشاهده میکرو حرکت پره‌ها را حتی بدون در نظر گرفتن سطح مقطع راداری آنها فراهم می‌سازد. در بسیاری از کاربردها، تعداد زیادی از نمونه‌های زمانی بین دو پالس دریافتی بدون استفاده باقی می‌ماند که می‌توان آنها را حذف نمود بنابراین، به‌منظور کاهش بار محاسباتی، یک پنجره ۲۰۰ نمونه‌ای حول نقطه‌ای که بازگشتی روتور بالگرد اتفاق می‌افتد، در نظر گرفته شده است.

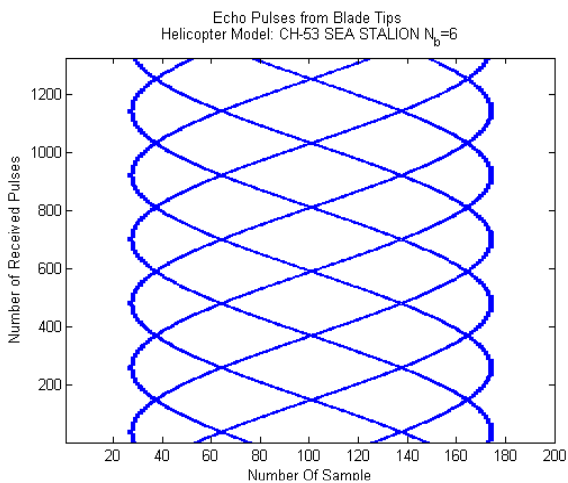
۴-۱. تولید پالس‌های بازگشتی

در این قسمت، پالس‌های بازگشتی از نوک پره‌های چهار مدل بالگرد مختلف که مشخصات آنها در جدول (۱) ارائه شده است، به‌ازای پارامترهای راداری یکسان، تولید و شبیه‌سازی شده است. در اینجا، به‌طور پیش فرض، پارامترهای راداری از قبیل PRF و TOT، به‌گونه‌ای انتخاب شده است که بتوان یک دور چرخش هر پره را مشاهده نمود. به‌گونه‌ای که تعداد پالس‌های دریافتی مطابق با مقدار بدست آمده از رابطه (۴) باشد. جابه‌جایی پالس‌های بازگشتی ناشی از حرکت سریع پره‌های بالگرد، در شبیه‌سازی‌های ارائه شده در شکل‌های (۱۰-۷) به‌وضوح قابل مشاهده است. در برخی زوایای دید، برد دو پره با یکدیگر برابر می‌شود و پالس‌های بازگشتی از هرکدام از پره‌ها به یک اندازه شیف‌ت پیدا می‌کند. بنابراین، در این نقاط، قله‌هایی با دامنه ۲ مشاهده می‌شود. از آنجایی که میکرو حرکت پره‌ها به‌گونه‌ای است که برد هرکدام از پره‌ها حین چرخش به‌صورت متناوب کم و زیاد می‌شود، جابه‌جایی پالس دریافتی به‌صورت سینوسی تغییر کرده و تکرار می‌شود. این جابه‌جایی‌های سینوسی و همچنین قله‌های مذکور، در شکل‌های (۷)، (۹)، (۱۱) و (۱۳)، قابل مشاهده است.



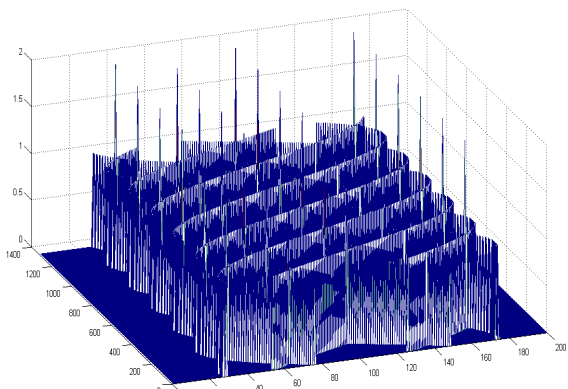
شکل ۷. بازگشتی‌های پره‌های مدل H-5

شکل (۱۳)، پالس‌های بازگشتی از پره‌های بالگرد ۶ پره‌ای CH-53 را نشان می‌دهد. در این شکل، ۶ سینوسی ناشی از یک دور چرخش کامل هر پره نشان داده شده است. در این شبیه‌سازی نیز PRF برابر با ۴k در نظر گرفته شده است. در شکل (۱۴) نیز، دامنه‌های بازگشتی‌های شبیه‌سازی شده در شکل (۱۳) در سه بعد شبیه‌سازی و ارائه شده است.



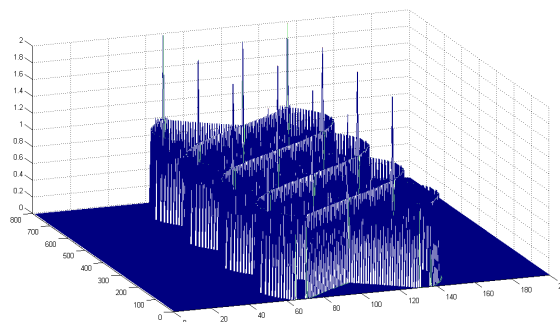
شکل ۱۳. بازگشتی‌های پره‌های مدل CH-53

با مقایسه شکل‌های (۱۴-۷) می‌توان دریافت، تعداد پالس‌های مورد نیاز برای مشاهده یک دور چرخش کامل پره‌های هر کدام از مدل‌های معرفی شده، متفاوت است و با بیشتر شدن تعداد پره‌ها کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با بیشتر شدن تعداد پره‌ها سرعت چرخش آنها نیز کاهش یافته و در نتیجه، رادار مدت بیشتری برای مشاهده یک دور چرخش روتور نیاز دارد.



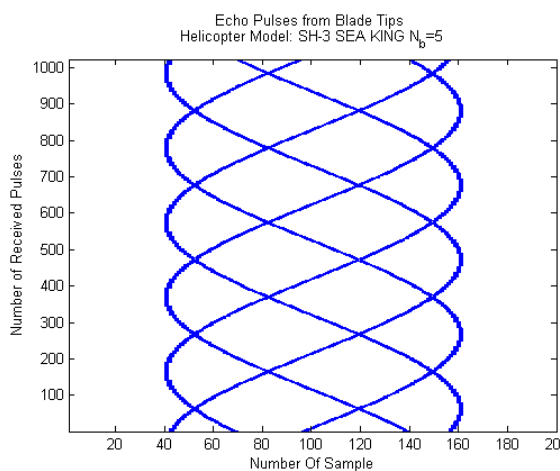
شکل ۱۴. بازگشتی‌های پره‌های مدل CH-53 در سه بعد

درواقع، سرعت چرخش پره‌ها در دوره تناوب یک دور چرخش کامل هر پره تأثیرگذار است و بنابراین می‌توان با استفاده از الگوریتم نشان داده شده در شکل (۶)، سرعت چرخش روتور بالگرد را از روی این سیگنال‌های بازگشتی اندازه‌گیری نمود. این مسئله به تفصیل در بخش ۴-۲ بررسی شده است.



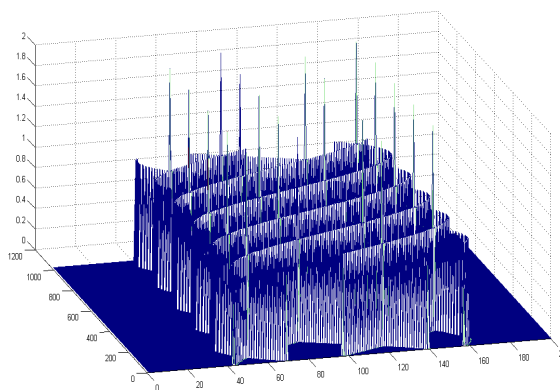
شکل ۱۰. بازگشتی‌های پره‌های مدل AH-64 در سه بعد

شکل (۱۱)، پالس‌های بازگشتی از پره‌های بالگرد ۵ پره‌ای SH-3 را در مدت یک دور چرخش کامل هر پره این بالگرد نشان می‌دهد. در این شکل، ۵ سینوسی مشاهده می‌شود که معادل با تعداد پره‌ها است. در این شبیه‌سازی نیز PRF برابر با ۴k در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۱. بازگشتی‌های پره‌های مدل SH-3

در شکل (۱۲)، دامنه بازگشتی‌های شبیه‌سازی شده در شکل (۱۱) را در سه بعد ارائه می‌دهد. در اینجا نیز با بیشتر شدن تعداد پره‌ها، تعداد قله‌ها نسبت به شکل (۸ و ۱۰) بیشتر شده است.



شکل ۱۲. بازگشتی‌های پره‌های مدل SH-3 در سه بعد

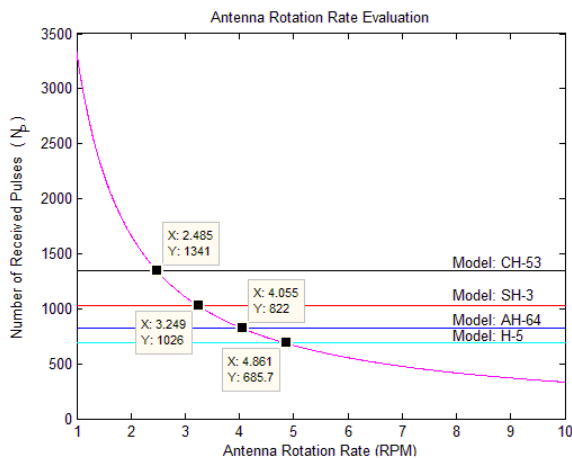
۴-۲. استخراج مشخصات هدف و ارزیابی پارامترهای رادار

در این قسمت، پارامترهایی همچون TOT و سرعت چرخش آنتن رادار مورد ارزیابی قرار گرفته است. چنانچه، بازگشتی‌های مناسب و دقیقی از پره‌ها دریافت شده باشد، می‌توان تعداد پره‌ها و سرعت چرخش روتور بالگرد را با استفاده از الگوریتم معرفی شده در شکل (۶) محاسبه نمود. برای دستیابی به این مقصود، لازم است سیگنال بازگشتی رادار، حاوی اطلاعات یک دور چرخش کامل هرکدام از پره‌ها باشد. بنابراین برای تخمین سرعت چرخش پره‌ها، می‌بایست ω_r به‌گونه‌ای انتخاب شود که حداقل تعداد پالس‌های دریافتی مطابق با رابطه (۴) باشد.

جدول ۲. انتخاب پارامتر TOT

مدل بالگرد	H-5 SIKORSKY	AH-64 APACHE	SH-3 SEA KING	CH-53 SEA STALLION
V_{rot}	۲۵۶/۵۶۳۴	۲۲۱/۲۸۴۸	۲۲۰/۹۸	۲۰۶/۱۹۳۱
ω_r	۴/۸۶۱	۴/۰۵۵	۳/۳۴۹	۲/۴۸۵
N'_p	۶۸۵/۷	۸۲۲	۱۰۲۶	۱۳۴۱
$\Delta_R = \omega'_R - \omega_R$	۰/۶۴	۱/۴۴۵	۲/۲۵۱	۳/۰۱۵
$\Delta N_p = N'_p - N_p $	۸۵/۷	۲۲۲	۴۲۶	۷۴۱

بیشتر این مطلب، در ادامه، تعداد پالس‌های دریافتی از هر کدام از مدل‌ها به ازای ω_r که از مقدار مجاز تعیین شده در شکل (۱۵) بیشتر است (به‌عنوان مثال $1 \text{ RPM} \approx 5/5$)، محاسبه شده و در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۱۵. تعداد پالس‌های مورد نیاز برای مشاهده یک دور چرخش کامل پره‌های هرکدام از مدل‌ها و حداکثر سرعت چرخش آنتن متناظر با آنها

بنابراین، در این شبیه‌سازی‌ها سرعت چرخش آنتن رادار به اندازه‌ای در نظر گرفته شده است که برای هیچکدام از بالگردها مناسب نباشد. با بررسی نتایج شبیه‌سازی‌های ارائه شده در جدول (۲) می‌توان دریافت که در بالگردهایی که سرعت چرخش روتور

در این جدول، $\omega'_r = 5/5$ ، سرعت چرخش آنتن رادار (بر حسب RPM)، حداکثر نرخ چرخش مجاز برای آنتن رادار (بر حسب RPM)، N'_p تعداد پالس‌های متناظر با ω_r و $N_p \approx 600$ ، تعداد پالس‌های دریافتی متناظر با ω'_r می‌باشد).

چنانچه ω_r در رابطه (۶) صدق نکند، الگوریتم تخمین سرعت چرخش روتور با مشکل مواجه خواهد شد. طبق رابطه (۴)، حداقل تعداد پالس‌های بازگشتی مورد نیاز برای هرکدام از مدل‌ها با دیگری متفاوت خواهد بود. خطوط افقی رسم شده در این نمودار، نشان دهنده حداقل تعداد پالس لازم برای آشکارسازی یک دور چرخش پره‌های هرکدام از چهار مدل بالگرد معرفی شده در جدول (۱) هستند و با استفاده از رابطه (۴) رسم شده‌اند.

در این شبیه‌سازی، PRF رادار ثابت و برابر با ۴kHz فرض شده است. اختلاف بین منحنی‌های افقی رسم شده در شکل (۱۵)، تنها به دلیل اختلاف سرعت چرخش پره‌ها می‌باشد و بنابراین حداکثر سرعت چرخش آنتن رادار، برای هرکدام از مدل‌ها با دیگری متفاوت می‌باشد. طبق رابطه (۵)، تعداد پالس‌های بازگشتی از هدف، با سریع‌تر شدن چرخش آنتن رادار کاهش می‌یابد. منحنی رسم شده در شکل (۱۵)، مبین این واقعیت است.

لازم به‌ذکر است چنانچه سرعت چرخش آنتن رادار بیش از مقادیر محاسبه شده در شکل (۱۵) باشد، قبل از اینکه روتور یک دور کامل بزند، پرتوی آنتن رادار از روی هدف رد شده و تعداد پالس‌های دریافتی در رابطه (۴) صدق نخواهد کرد. به‌منظور مطالعه

¹ Round Per Minute

ارائه شده، حداقل برابر با 0.106 m/s و حداکثر برابر با 0.6116 m/s به دست آمد. در نهایت، با تغییر پارامتر TOT و سرعت چرخش آنتن رادار (ω_p)، سیگنال‌های دریافتی از پره‌ها شبیه‌سازی شد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها مؤید این مطلب بود که در حالتی که ω_p در محدوده تعیین شده در مقاله صدق نکند، پالس‌های بازگشتی برای تخمین V_{Rot} مناسب نیستند و ω_p می‌بایست کمتر از حد بالای تعریف شده انتخاب شود.

۶. مراجع

- [1] Thayaparan, T.; Abrol, S.; Riseborough, E.; Stankovic, L.; Lamothe D.; Duff, G. "Analysis of Radar Micro Doppler Signatures from Experimental Helicopter and Human Data"; IET Radar Sonar Navig. 2007, 1, 289-299.
- [2] Li, K.; Liu, Y.; Huo, K.; Jiang, W.; Li, X.; Zhuang, Z. "Estimation of Micro-Motion Parameters Based on Cyclostationary Analysis"; IET Signal Proc. 2010, 4, 218-223.
- [3] Zhang, Q.; Tat Soon, Y.; Hwee Siang, T.; Ying, L. "Imaging of a Moving Target with Rotating Parts Based on the Hough Transform"; IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing 2008, 46, 291-299.
- [4] Chen, V. C. "Analysis of Radar Micro-Doppler Signature With Time-Frequency Transform"; Proc. of the IEEE Workshop on Statistical Signal and Array Proc (SSAP), Pocono, PA, 2000, 463-466.
- [5] Li, H.; Qu, X.; Wang, W. "Multi-Body Motion Modeling and Simulation for Tilt Rotor Aircraft"; Chinese J. Aeronautics 2009, 4, 415-422.
- [6] Chen, V. C.; Li, F.; Shen, S. H.; Wechsler, H. "Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study"; IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Sys. 2006, 42, 2-21.
- [7] Bell, M. R.; Grubbs, R. A. "JEM Modeling and Measurement for Radar Target Identification"; IEEE Trans. on Aero and Electronic Systems 1993, 29, 73-87.
- [8] Chen, V. C. "The Micro-Doppler Effect in Radar"; Artech. House, UK, London, 2011.
- [9] Borden, B. "Radar Imaging of Airborne Targets-A Primer for Applied Mathematicians and Physicists"; Naval Air Warfare Center Weapons Division China Lake, California, 1999.
- [10] Setlur, P.; Ahmadn, F.; Amin, M. "Helicopter Radar Return Analysis: Estimation and Blade Number Selection"; J. Signal Proc. 2011, 91, 1409-1424.
- [11] Chen, G.; Yu, H.; Yang, X. "Micro-Doppler Analysis and Parameter Estimation of the Rotating Linear Rigid Target"; Proc. of the IEEE, International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), 2012, 1, 94-97.
- [12] Misiurewicz, J.; Kulpa, K.; Czekaiat, Z. "Analysis of Radar Echo from a Helicopter Rotor Hub"; Proc. of the IEEE Int. Conf. Microwave and Radar 1998, 3, 866-870.
- [13] Nayeibi, M.; Haghshenas, H. "A Novel Method to Detect Rotor Blades Echo"; In Proc. IEEE Radar Conf. 2010, 1331-1334.
- [14] Wang, X.; Paliwal, K. K. "Feature Extraction and Dimensionality Reduction Algorithms and Their Applications in Vowel Recognition"; J. Pattern Recognition Society 2003, 36, 2429-2439
- [15] Davies, P. G.; Hughes, E. J. "Medium PRF Set Selection Using Evolutionary Algorithms"; IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Sys. 2002, 38, 933-939.

آنها کمتر است، تعداد پالس‌های لازم برای مشاهده یک دور چرخش هر پره بیشتر می‌باشد و بنابراین سرعت چرخش آنتن متناظر با آنها نیز کمتر است. با در نظر گرفتن سرعتی برابر با $5/5 \text{ RPM}$ برای چرخش آنتن رادار، تعداد پالس‌های دریافتی از بالگرد CH-53 بیش از بقیه بالگردها کاهش یافته است. این کاهش تعداد پالس که در جدول (۲) با ΔN_p نشان داده شده است، به دلیل کمتر بودن سرعت چرخش روتور این بالگرد نسبت به بقیه می‌باشد. لازم به ذکر است که هرکدام از منحنی‌های سینوسی مربوط به پره‌ها، در بخشی از دوره تناوبشان دریافت شده‌اند و در نتیجه یک دور چرخش کامل پره‌ها از روی آنها قابل مشاهده نمی‌باشد و در این حالت سرعت چرخش پره‌ها را نمی‌توان با استفاده از الگوریتم شکل (۶) به درستی تخمین زد. بنابراین، پارامتر سرعت چرخش آنتن رادار، در میزان اطلاعات سیگنال دریافتی بسیار تأثیر گذار است.

لازم به ذکر است که انتخاب مناسب PRF، موجب می‌شود تعداد پالس‌های بازگشتی در مدت زمان مشاهده هدف، بیشتر شود. در نتیجه به دلیل زیادتر شدن تراکم نمونه‌ها، احتمال اینکه یکی از پره‌ها در یک پالس بازگشتی نمونه‌ای نداشته باشد خیلی کمتر خواهد شد و به دنبال آن می‌توان مقدار کوچک‌تری برای همسایگی تعریف شده در الگوریتم شکل (۶) انتخاب نمود. این امر موجب می‌شود که دقت تخمین بیشتر شود.

۵. نتیجه‌گیری

به دلیل ظهور فناوری پیشرفته تسلیحات آفند هوایی جدید، استفاده از تسلیحات پدافند هوایی مجهز به سیستم‌های هوشمند و مدرن امری لازم و اجتناب ناپذیر است. در مقاله حاضر با این رویکرد، میکرو حرکت‌های پره‌های چرخان بالگرد شناور، به عنوان ویژگی متمایز کننده بالگردها مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور، پالس‌های بازگشتی از پره‌ها با رزولوشن برد بالا، مدل‌سازی و شبیه‌سازی شد. مدل‌سازی انجام شده در این مقاله با استفاده از توابع ریاضی و نرم‌افزارهای کامپیوتری همچون MATLAB، صورت گرفت. مدل‌سازی بازگشتی‌هایی که حاوی اطلاعات اجزاء چرخان اهداف هستند، امکان مانور بیشتر بر روی مدل اهداف را فراهم می‌کند. از آنجایی که، عملکرد الگوریتم‌های استخراج ویژگی اهداف راداری، به شدت وابسته به دقت داده‌های مورد استفاده می‌باشد، پارامترهایی همچون TOT و PRF به عنوان دو عامل تعیین کننده در دقت پالس‌های بازگشتی مورد مطالعه قرار گرفت و مقادیر مجاز برای انتخاب این پارامترها با استفاده از روابط ریاضی تعیین و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شد. فرایند شبیه‌سازی به این صورت بود که در ابتدا پالس‌های بازگشتی از چهار مدل بالگرد، به‌ازای پارامترهای راداری یکسان به دست آمد، سپس الگوریتمی به منظور تخمین سرعت چرخش نوک پره‌های بالگرد (V_{Rot}) معرفی و ارائه گردید و V_{Rot} هرکدام از چهار مدل بالگرد با استفاده از این الگوریتم اندازه‌گیری شد. خطای تخمین در الگوریتم

- [21] Martin, J.; Mulgrew, B. "Analysis of the Theoretical Radar Return Signal from Aircraft Propeller Blades"; IEEE Int. Radar Conf. 1990, 569-572.
- [22] Schneider, H. "Application of an Autoregressive Reflection Model for the Signal Analysis of Radar Echoes from Rotating Objects"; Proc. of the IEEE, Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Proc. 1988, 1236-1239.
- [23] Padfield, D. "Helicopter Flight Dynamics, the Theory and Application of Flying Qualities and Simulation Modeling"; Blackwell, 2007.
- [24] Skolnik, M. "Introduction to Radar Systems"; McGraw Hill, 2005.
- [16] Long, W. H.; Harringer, K. A. "Medium PRF for the AN/APG-66 Radar"; Proc. of the IEEE 1985, 73, 301-311.
- [17] Alabaster, C. M.; Hughes, E. J.; Mathew, J. H. "Medium PRF Radar PRF Selection Using Evolutionary Algorithms"; IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Sys. 2003, 39, 990-1001.
- [18] Tait, P. "Introduction to Radar Target Recognition (Radar, Sonar & Navigation)"; The Institution of Eng. and Tech. London, 2008.
- [19] Thayaparan, T.; Stankovic, L.; Jurovic, D.; Penamati, S.; Venkataramaniah, K. "Intelligent Radar Target Recognition Using Micro Doppler Signatures"; In Proc. of SPIE, 2009, 7308, 1-11.
- [20] Chen, V. C.; Ling, H. "Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis"; Artech House, USA, Boston, 2002.