

## استفاده از مایکروداپلر سیگنال بازگشتی رادار در استخراج مشخصات بالگرد

فاطمه همدانی گلشن<sup>۱</sup>، احسان یزدیان<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۳۰)

## چکیده

پردازش مایکروداپلر برای استخراج ویژگی‌های هدف در سالیان اخیر مورد توجه پژوهشگران متعدد قرار گرفته است. علاوه بر سرعت شعاعی اهداف نسبت به رادار، که باعث شیفت فرکانسی داپلر در فرکانس سیگنال بازگشتی به رادار می‌شود، حرکات دیگری نیز در بعضی از اهداف وجود دارد که مدولاسیون فرکانسی سوار بر فرکانس داپلر اصلی را ایجاد می‌کند. لرزش‌های بدنه و موتور هواپیما و چرخش پره‌های بالگرد نمونه‌هایی از این حرکاتند که باعث تولید جابجایی فرکانسی متناوب در زمان می‌شوند که به آن مایکروداپلر می‌گوییم. بر مبنای اطلاعات مایکروداپلر دریافتی از سیگنال بازگشتی رادار، اطلاعات زیادی از مشخصات هدف قابل استخراج بوده و می‌توان مشخصه‌های مختلف هدف را تخمین زد. در این مقاله به‌طور خاص به سیگنال مایکروداپلر بالگرد پرداخته شده است. تخمین مشخصه‌های بالگرد در زمینه تعداد پره‌ها، طول و سرعت زاویه‌ای دوران آن‌ها که در نهایت می‌تواند منجر به شناسایی کامل طرح بالگرد شود، از اهداف این تحقیق است. بدین منظور روش‌های ارائه شده برای تخمین مشخصه‌های بالگرد معرفی، دسته‌بندی و مرور می‌شوند.

## کلید واژه‌ها: مایکروداپلر، بالگرد، تخمین مشخصه، رادار

## ۱- مقدمه

مجزا از حرکت اصلی در جسم اتفاق بیفتد، می‌تواند شیفت داپلری مخصوص به خود را ایجاد کند و باعث ایجاد مدولاسیون باند کناری حول فرکانس اصلی داپلر شود. حرکات چرخشی، لرزشی و مخروطی یک جسم، حرکات کوچکی هستند که موجب شیفت‌های فرکانسی متناوب می‌شوند. چرخش پره‌های روتور یک بالگرد یا پهباد، لرزش بدنه یا موتور هواپیما، چرخش توربین‌های بادی و حرکات دست و پای انسان نمونه‌هایی از این نوع حرکت است. بر این اساس پدیده مایکروداپلر در حوزه‌های علوم و مهندسی متنوعی مورد تحقیق قرار گرفته است.

در بعضی از کاربردها پدیده مایکروداپلر عامل مزاحمی است که تلاش می‌شود از سیگنال بازگشتی حذف شود. زیرا وجود آن می‌تواند روی تخمین ویژگی‌های اصلی هدف مانند سرعت آن اثر بگذارد. مراجعی چون [۱ و ۲] روش‌هایی را برای جداسازی و حذف این پدیده از داپلر اصلی بدنه هدف ارائه کرده‌اند. برخی دیگر از تحقیقات از مایکروداپلر در جهت استخراج اطلاعات بیشتر به‌منظور شناسایی<sup>۳</sup> و دسته‌بندی هرچه دقیق‌تر اهداف استفاده می‌کنند. مثلاً در اهدافی مانند بالگرد و پهباد، پره‌ها دارای حرکت دورانی هستند. برای تشخیص نوع هدف، لازم است که ویژگی پره‌ها مانند تعداد، سرعت دوران و طول آن‌ها استخراج شود.

استفاده از مشخصه‌های مایکروداپلر سیگنال، مانند دوره تناوب تکرار داپلر، دامنه و زاویه اولیه به تشخیص ویژگی‌های هدف، دسته‌بندی و متمایز کردن اهداف کمک می‌کند [۳-۵]. به‌عنوان نمونه چرخش پره‌های بالگرد در حین پرواز منجر به

سال‌های متمادی است که از رادار برای تشخیص و استخراج ویژگی‌های اهداف مختلف استفاده می‌شود. رادار با انجام پردازش‌های مختلف روی سیگنال بازگشتی از هدف، اقدام به شناسایی مشخصات آن می‌کند. تشخیص وجود هدف، اندازه‌گیری فاصله آن از رادار و سرعت شعاعی، جنس و شکل بدنه و در نهایت شناسایی کامل هدف از جمله کارهایی است که یک رادار می‌تواند انجام دهد. یکی از پردازش‌های مهم که برای تشخیص سرعت هدف انجام می‌گیرد، پردازش داپلر است. در پدیده داپلر، اگر هدف متحرک باشد، فرکانس سیگنال بازگشتی نسبت به فرکانس ارسالی مقداری شیفت می‌یابد که به آن شیفت داپلر می‌گویند. شیفت داپلر برای یک هدف با سرعت  $v$  برابر است با:

$$f_d = -\frac{2v}{c} f \quad (1)$$

که در آن  $c$  سرعت نور و برابر با  $3 \times 10^8$  است.

به مرور زمان در بعضی از اهداف مشاهده شد که علاوه بر شیفت فرکانسی داپلر، مدولاسیونی حول فرکانس اصلی اتفاق می‌افتد. پس از بررسی این پدیده مشخص شد که این مدولاسیون مربوط به حرکات کوچک<sup>۱</sup> دیگری در هدف است. این پدیده مایکروداپلر<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. به‌طور کلی هر حرکتی که

\* رایانامه نویسنده مسئول: yazdian@iut.ac.ir

<sup>۳</sup> Identification<sup>۱</sup> Micro Motion<sup>۲</sup> Micro Doppler

## ۲- نمونه‌سازی پدیده مایکروداپلر

در این قسمت درباره شیفت مایکروداپلر و نمایش زمان-فرکانس توضیح داده شده و سیگنال بازگشتی از بالگرد تحلیل می‌شود.

### ۲-۱- شیفت مایکروداپلر در حوزه زمان-فرکانس

همان‌طور که در مقدمه بیان شد، حرکات کوچک در جسم مانند حرکات لرزشی و چرخشی، شیفت مایکروداپلر متغیر با زمان ایجاد می‌کنند. زیرا با کم و زیاد شدن فاصله نقاط پراکنده‌ساز جسم از رادار، تأخیر سیگنال بازگشتی، تابعی پیچیده از زمان خواهد بود. این تأخیر متغیر با زمان، باعث ایجاد فاز و فرکانس متغیر با زمان می‌شود. بنابراین تفاوت عمده شیفت مایکروداپلر با شیفت داپلر معمولی در این است که به‌خاطر ثابت نبودن راستا، زاویه و سرعت نسبی هدف نسبت به رادار، فرکانس ایجاد شده ثابت نبوده و برای تحلیل آن، تبدیل فوری مناسب نیست زیرا این روش نمی‌تواند اطلاعات فرکانسی وابسته به زمان را به‌دست بیاورد. روش رایج برای توصیف این سیگنال، تحلیل توأم زمان-فرکانس<sup>۲</sup> می‌باشد [۶].

تحلیل توأم زمان-فرکانس، که برای تحلیل طیف فرکانس متغیر با زمان به‌کار می‌رود، برای سیگنال‌های تک مؤلفه‌ای و چند مؤلفه‌ای مناسب است و محل توزیع انرژی یک سیگنال در دو بعد زمان و فرکانس را نشان می‌دهد. برای تحلیل سیگنال در این حوزه، نیاز به یافتن نمایش زمان-فرکانسی مناسب است.

### \* یافتن نمایش زمان-فرکانس

در پردازش‌های حوزه زمان-فرکانس، به‌منظور داشتن تخمینی قابل قبول، ابتدا باید برای یافتن نمایشی مناسب در حوزه زمان-فرکانس تلاش کرد. منظور از نمایش زمان-فرکانس مناسب، نمایشی است که تفکیک‌پذیری<sup>۳</sup> زمانی و فرکانسی آن بالا باشد، به‌عبارتی طیف مایکروداپلر تا حد امکان به ایده‌آل خود نزدیک باشد و علاوه بر این جملات تداخلی وجود نداشته باشد. در این راستا توزیع‌های زمان-فرکانس مختلفی پیشنهاد شده‌اند. اما هنوز هیچ توزیعی که برای همه سیگنال‌ها ایده‌آل باشد ارائه نشده است. این مساله یکی از اساسی‌ترین مشکلاتی است که در تحلیل‌های این حوزه وجود دارد. به‌طور کلی می‌توان توزیع‌ها را به دو دسته وابسته به مشخصه و مستقل از مشخصه تقسیم کرد. توزیع‌های وابسته به مشخصه، توزیع‌های وابسته به طرح سیگنال هستند که برای هر سیگنال از یک کرنل با مشخصات همان سیگنال استفاده می‌کنند. این توزیع‌ها در صورت انطباق با سیگنال دارای دقت بسیار خوبی می‌باشند [۱۷]. توزیع‌های غیرمشخصه‌ای که سال‌هاست برای انواع سیگنال‌ها مورد استفاده

تولید مایکروداپلری سوار بر داپلر اصلی بالگرد می‌شود که می‌توان با استفاده از آن مشخصات پره‌ها را استخراج کرد. مثال دیگر استفاده از مایکروداپلر سیگنال بازگشتی از انسان هنگام راه رفتن است که سرعت گام و طول پا و دست‌ها از روی آن قابل استخراج است [۳ و ۶]. همچنین از روش‌هایی مانند یادگیری ماشین برای طیف مایکروداپلر اشیاء، برای دسته‌بندی، تشخیص هویت انسان‌ها، تعیین فعالیت آن‌ها (مانند راه رفتن، دویدن، نشستن و ...)، شناسایی وسایل نقلیه (مانند بالگرد، تانک، کشتی و ...) و حتی حیوانات و پرندگان استفاده شده است [۵ و ۷-۱۱].

استفاده از روش‌های صوتی برای تحلیل مایکروداپلر یکی دیگر از موضوعاتی است که محققان به آن پرداخته‌اند [۱۲]. صوت مربوط به سیگنال مایکروداپلر می‌تواند به تشخیص نوع حرکت هدف و تمایز بین انسان‌ها کمک کند. ساختار عصبی مغز انسان و صداهایی که مغز روزانه آن‌ها را یاد گرفته است امکان پردازش صوتی و استفاده از سیگنال مایکروداپلر را فراهم می‌کند. دسته‌بندی سیگنال صوتی امروزه در سونار به‌کار می‌رود [۱۳].

یکی دیگر از ویژگی‌های ممتاز سامانه راداری داپلر، تشخیص اشخاص و حرکات آن‌ها از پشت موانع است. در هنگام زلزله، برای تشخیص محل افراد زیر آوار، از مایکروداپلر ناشی از تنفس و ضربان قلب آن‌ها می‌توان کمک گرفت. البته جنس و ضخامت مانع بر روی امضای<sup>۱</sup> مایکروداپلر تاثیر می‌گذارد [۳ و ۱۴]. در [۱۰] کاربردهای دیگر مایکروداپلر از قبیل کاربردهای مافوق صوت و رادار روزنه مصنوعی بیان شده است. هدف اصلی در این مقاله، بررسی پدیده مایکروداپلر در بالگرد و مرور راهکارهای ارائه شده برای تخمین ویژگی‌های پره بالگرد است. در این راستا در سال‌های قبل از ۲۰۰۰ میلادی، تحقیقاتی درباره دسته‌بندی بالگردها وجود دارد. در [۱۵] با استفاده از نسبت طول پره به تعداد پره، دسته‌بندی بالگردها انجام شده است. در [۱۶] تحلیل سیگنال مایکروداپلر بالگرد در حوزه زمان-فرکانس انجام شده و در مورد زوج یا فرد بودن تعداد پره‌ها تصمیم‌گیری شده است. هرچند این مراجع نتوانسته‌اند به‌درستی سیگنال بازگشتی از بالگرد را تحلیل کنند و به دسته‌بندی دقیقی دست یابند، زمینه را برای تحقیقات بیشتر در این حوزه فراهم کردند. در تحلیل پدیده مایکروداپلر بالگرد، هدف یافتن راهکاری مناسب برای تخمین مشخصه‌های بالگرد یعنی تعداد، طول و سرعت زاویه‌ای دوران پره‌ها است تا زمینه برای شناسایی و دسته‌بندی نوع بالگرد فراهم شود، در این مقاله، مراجعی که به پردازش سیگنال مایکروداپلر بالگرد پرداخته‌اند مرور خواهند شد. بر این اساس ادامه مقاله از ۲ بخش تشکیل شده است. در بخش دوم، نمونه‌سازی پدیده مایکروداپلر برای پره‌های بالگرد ارائه و تحلیل می‌شود. در بخش سوم، روش‌های مختلف ارائه شده برای تخمین مشخصه‌های پره بالگرد دسته‌بندی و مرور می‌شوند.

<sup>۲</sup> Joint time-frequency

<sup>۳</sup> Resolution

<sup>۱</sup> Signature

دسته از روش‌ها تبدیل را به حوزه ابهام می‌برند. در حوزه ابهام، جملات تداخلی دور از مرکز هستند و می‌توان آن‌ها را با فیلتر پایین‌گذر (کرنل مناسب) فیلتر نمود. این توزیع به شکل زیر است:

$$C(\omega, t) = \iiint \Phi(\theta, \tau) f^* \left( u - \frac{\tau}{2} \right) f \left( u + \frac{\tau}{2} \right) e^{-j\omega\tau - j\theta t + j\theta u} du d\tau d\theta \quad (4)$$

که در آن  $\Phi(\theta, \tau)$  کرنل می‌باشد.

مشکل خطای مراتب بالای فاز باعث شد تا روش‌های دیگری معرفی شوند. برای مثال می‌توان به دسته توزیع‌های زمان مختلط (CTD)<sup>۵</sup> اشاره کرد. در این روش‌ها با تکنیکی خاص سعی می‌شود که از خطای مشتقات مراتب بالاتر فاز کاسته شود [۲۳-۲۱] رابطه مربوط به یکی از انواع CTD به صورت زیر می‌باشد:

$$CTD_4(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f \left( t + \frac{\tau}{4} \right) f^{-1} \left( t - \frac{\tau}{4} \right) f^{-1} \left( t + j\frac{\tau}{4} \right) f^1 \left( t - j\frac{\tau}{4} \right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

در رابطه (۵) دوتا از جملات دارای آرگومان زمانی مختلط هستند. آرگومان زمان مختلط در عمل مفهوم فیزیکی ندارد ولی با استفاده از رابطه (۶) می‌توان آن را تولید کرد:

$$\begin{aligned} x(n + jm) &= \frac{1}{N} \sum X(k) e^{-\frac{2\pi}{N}mk} e^{j\frac{2\pi}{N}nk} \\ &= IFFT[X(k) e^{-\frac{2\pi}{N}mk}] \end{aligned} \quad (6)$$

در این روش‌ها نیز می‌توان با اصلاح و فیلتر کردن در حوزه ابهام از جملات تداخلی نیز جلوگیری نمود [۲۰].

## ۲-۲- امضای مایکروداپلر اشیاء

امضا برای اشاره به یک ویژگی خاص از اشیاء به کار می‌رود که به وسیله آن اشیاء و افراد هویت می‌یابند. امضای مایکروداپلر یک شی، نمایش زمان-فرکانس حرکت آن است. برای مثال نوسان دست و پای هر انسانی هنگام حرکت مختص به همان فرد می‌باشد [۲۴]. یا بعضی مراجع از این امضا برای تشخیص نوع فعالیت انسانی استفاده می‌کنند [۷]. کاربردهای دیگری مانند تمایز وسایل نقلیه هوایی از پرندگان، تعیین نوع وسیله نقلیه اعم از تانک، خودرو، هواپیما، بالگرد و... برای امضای مایکروداپلر وجود دارد [۵ و ۱۱ و ۲۵]. بیشتر کارهای انجام شده در این حوزه، براساس یادگیری ماشین است. در شکل (۱) چند نمونه امضای مایکروداپلر مربوط به اهداف و فعالیت‌های مختلف مشاهده می‌شود.

قرار می‌گیرند، دارای انواع مختلفی می‌باشند [۱۸ و ۱۹]. ساده‌ترین آن‌ها تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) است؛

$$F(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) W^*(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

که  $W(t)$  پنجره زمانی توزیع می‌باشد. در واقع برای نمایش سیگنال در این حوزه، به جای تبدیل فوریه از سیگنال در طول زمان، پنجره‌ای با طول محدود روی سیگنال می‌لغزد و در بازه‌های زمانی محدود تبدیل فوریه می‌گیرد. این روش، فرکانس سیگنال در لحظات مختلف را به صورت متمایز به دست می‌آورد. اگر طول این پنجره کوتاه شود تفکیک پذیری در حوزه زمان بالا می‌رود، اما در عوض تفکیک پذیری در حوزه فرکانس کاهش می‌یابد. ایراد اصلی روش STFT همین است. حسن این روش خطی بودن آن است که برای سیگنال‌های چندمولفه‌ای بسیار مناسب می‌باشد.

یکی دیگر از توزیع‌های معروف، توزیع ویگنرویل (WVD)<sup>۲</sup> است. این توزیع برای سیگنال‌هایی که با فرکانس خطی نسبت به زمان مدوله شده‌اند، دارای قدرت تفکیک پذیری بالایی است ولی برای فرکانس‌های با مرتبه بالاتر مناسب نیست، زیرا مشتقات مرتبه بالاتر فاز در آن ایجاد خطا می‌کنند. مثلاً در مسأله بالگرد که فرکانس به صورت سینوسی متغیر با زمان است (مرتبه چندجمله‌ای بی‌نهایت است)، این توزیع ایده‌آل نیست. از دیگر مشکلات آن غیرخطی بودن و ایجاد جملات تداخلی برای سیگنال‌های چندمولفه‌ای می‌باشد. این توزیع به صورت زیر است:

$$WVT_f(\omega, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f^* \left( t - \frac{\tau}{2} \right) f \left( t + \frac{\tau}{2} \right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

پس از ویگنرویل روش‌های متعددی به وجود آمدند تا مشکل جملات تداخلی را حل کنند. برای مثال روش‌های توزیع شبه ویگنرویل (PWVD)<sup>۳</sup> و توزیع شبه ویگنرویل هموار شده (SPWVD)<sup>۴</sup> به حل این مشکل در توزیع ویگنرویل کمک می‌کنند [۲۰]. در این روش‌ها تابع کرنلی مناسب به رابطه اضافه می‌شود تا جملات تداخلی را فیلتر کند. با این حال این دسته از روش‌ها نیز برای سیگنال‌های مدوله شده فرکانسی با فاز حداکثر مرتبه دقیق می‌باشند. به همین دلیل تفکیک پذیری مخصوصاً در مورد سیگنال‌های با فاز سینوسی پایین می‌آید.

روش‌های Cohen class حالت کلی‌تر دو روش PWVD و SPWVD هستند و برای تبدیل‌های دیگر نیز به کار می‌روند. این

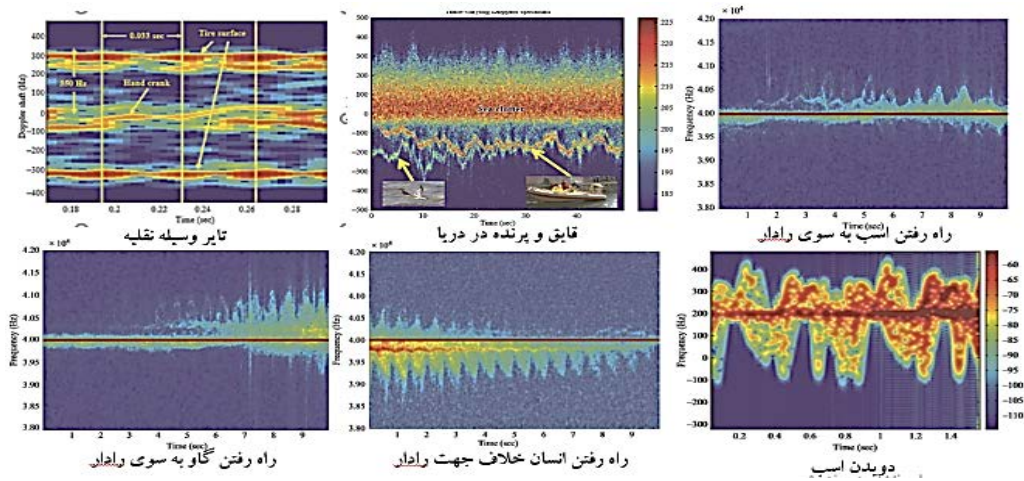
<sup>1</sup> Short Time Fourier Transform

<sup>2</sup> Wigner-Ville distribution

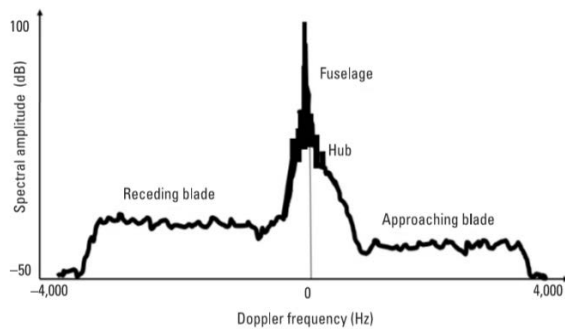
<sup>3</sup> Pseudo Wigner Ville Distribution

<sup>4</sup> Smooth Pseudo Wigner Ville Distribution

<sup>5</sup> Complex Time Distribution



شکل (۱): امضای مایکروداپلر اهداف مختلف [۳].



شکل (۲). طیف سیگنال بازگشتی از یک بالگرد [۶].

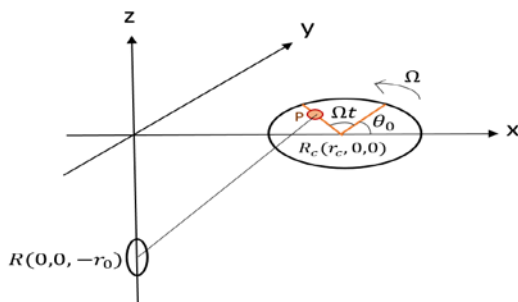
### ۳-۲- پدیده مایکروداپلر در روتور چرخان بالگرد

از آنجایی که حرکت اجزای هدف باعث شکل گیری مدولاسیونی در دامنه یا فاز سیگنال پراکنده شده از هدف می شود، این پدیده برای بالگرد که دارای پره های چرخان است نیز رخ می دهد.

لازم به ذکر است که نوع رادار مورد استفاده در این مسأله، رادار CW با سامانه های ساده می باشد. در بعضی از مقالات مانند [۲۶] از سامانه های راداری پیچیده مانند رادارهای با رزولوشن بالا استفاده می شود که دارای روش ها و روابط متفاوت می باشد.

### ۲-۳-۲- نمونه سازی پره های روتور چرخان بالگرد

در شکل (۳)، رادار به صورت ثابت در مکان  $R(0,0,-r_0)$  در دستگاه مختصات  $(X, Y, Z)$  قرار دارد. فرض می شود بالگرد دارای  $N$  پره (به صورت جسم صلب و خطی) بوده، طول هر پره برابر  $L$  و سرعت دوران پره ها  $\Omega$  است. مرکز پره ها روی مختصات  $R_c(r_c, 0, 0)$  در صفحه XOY قرار دارد.



شکل (۳): هندسه رادار و هدف.

فرض می شود فاصله نقطه پراکنده ساز دلخواه  $p(x_p, y_p, z_p)$  روی پره  $k$  ام تا مرکز پره ها یعنی  $R_c$ ، برابر  $l_p$  باشد. اگر زاویه اولیه دوران این نقطه  $\theta_0$  باشد، در لحظه  $t$  زاویه آن برابر است با:

$$\theta_t = \Omega t + \theta_0 \quad (7)$$

بنابراین نقطه  $p$  بعد از  $t$  ثانیه به مکان منتقل می شود.

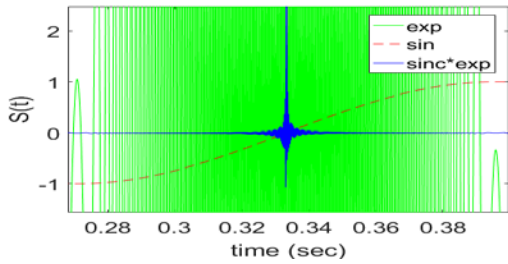
### ۱-۳-۲- پره های روتور بالگرد

طرح سازی ریاضی مایکروداپلر پره بالگرد در مراجع مختلفی صورت گرفته است. اگر چه یک پره چرخان همیشه دارای خمیدگی و پیچ خوردگی است، اما برای سادگی در نمونه سازی در اغلب مراجع مانند [۶، ۲۷ و ۲۸]، طرح آن به صورت یک جسم صلب، به شکل مستطیل ساده و یا حتی یک خط راست شامل نقاط پراکنده ساز در نظر گرفته می شود. در مرجع [۲۸]، نمونه سازی کاملی از پره های اصلی و پره های واقع بر دم بالگرد صورت گرفته است. در اینجا به بیان نمونه سازی مرسوم پره بالگرد می پردازیم.

در حالت کلی، پراکنندگی موج الکترومغناطیس از یک پره، شامل بازتاب آینه ای از سطح و لبه ها، شکستگی و دیگر انواع پراکنندگی ها است. در اینجا برای سادگی از طرح پراکنده ساز نقطه ای برای تحلیل سیگنال بازگشتی استفاده می شود. در شکل (۲) طیف داپلر یک بالگرد مشاهده می شود. در این طیف قسمت بدنه اصلی بیشترین سهم انرژی را در سیگنال بازگشتی دارد. پره های نزدیک شونده و دور شونده (نسبت به خط دید رادار)، شیفت های داپلری حول داپلر اصلی ایجاد کرده اند [۶]. در این شکل فرض شده است که فرکانس داپلر اصلی بدنه روی صفر قرار دارد. در صورت وجود داپلر غیرصفر، این شکل روی محور فرکانس شیفت می یابد.

### ۳-۳-۲- تحلیل زمانی سیگنال بازگشتی از بالگرد

با عمود شدن جهت انتشار سیگنال رادار به سطح پره، یک قله در سیگنال بازگشتی مشاهده می‌شود که به آن فلش<sup>۱</sup> گفته می‌شود. در این حالت بیشترین سطح از پره توسط رادار دیده شده (بیشینه سطح مقطع راداری (RCS<sup>۲</sup>)) و سرعت شعاعی پره نسبت به رادار به حداکثر می‌رسد. وجود این فلش‌ها از طریق جمله سینک در رابطه (۱۵) زمانی که  $\cos(\Omega t + \theta_0 + \frac{k2\pi}{N})$  برابر صفر می‌شود نیز قابل اثبات است. شکل (۴) یک دوره تناوب از سیگنال زمانی را نشان می‌دهد. نمودار سبز رنگ مربوط به عبارت  $\exp\{j\Phi_k(t)\}$  است که با ضرب در سینک تبدیل به نمودار آبی رنگ می‌شود. نمودار قرمز خط چین آرگومان سینوسی سینک را نشان می‌دهد. طبق نمودار دقیقاً در زمانی که این سینوسی صفر شده، پیک سینک رخ داده است. در شکل سینوس با دامنه نرمالیزه ۱ رسم شده است، اما دامنه واقعی برابر با  $\frac{4\pi L}{\lambda} \cos(\beta)$  است که به خاطر وجود عبارت طول موج کوچک در مخرج، می‌تواند بسیار بزرگ باشد. یعنی آرگومان داخل سینک دارای تغییرات بزرگی است و سینک به شدت باریک می‌شود.



شکل (۴): سیگنال بازگشتی از بالگرد.

نکته دیگر این است که اگر تعداد پره‌ها زوج باشد، پره‌ها دو به دو روبه‌روی هم بوده و در نتیجه فلش‌هایشان روی هم قرار می‌گیرند. یعنی برای هر دو پره، دو فلش در یک دور چرخش روتور وجود دارد. بنابراین برای یک بالگرد ۴، ۶ یا ۸ پره‌ای با سرعت ۴ دور بر ثانیه، در یک ثانیه به ترتیب ۱۶، ۲۴ و ۳۲ فلش ایجاد می‌شود. اما برای تعداد فرد پره، هر پره دو فلش مجزا در یک دور چرخش روتور ایجاد می‌کند. به‌طور کلی داریم:

$$\begin{cases} T_{flash} = \frac{2\pi}{2N\Omega} & \text{if } N \text{ is odd} \\ T_{flash} = \frac{2\pi}{N\Omega} & \text{if } N \text{ is even} \end{cases} \quad (16)$$

### ۳-۳-۲- تحلیل فرکانسی سیگنال بازگشتی از بالگرد

با مشتق گرفتن از فاز  $s_p(t)$ ، شیفت مایکروداپلر ایجاد شده توسط نقطه پراکنده‌ساز  $p$  به‌دست می‌آید:

$$f_{p-md} = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi_p(t)}{dt} = \frac{-2Al_p\Omega \sin(\Omega t + \theta_0)}{\lambda} \quad (17)$$

$$\begin{cases} x_p = r_c + l_p \cos(\Omega t + \theta_0) \\ y_p = l_p \sin(\Omega t + \theta_0) \\ z_p = 0 \end{cases} \quad (8)$$

در نتیجه فاصله نقطه  $p$  از رادار در لحظه  $t$  برابر است با:

$$R_p(t) = [(r_c + l_p \cos(\Omega t + \theta_0))^2 + (l_p \sin(\Omega t + \theta_0))^2 + r_0^2]^{1/2} \quad (9)$$

که با استفاده از تقریب سری تیلور داریم:

$$R_p(t) = B + Al_p \cos(\Omega t + \theta_0) \quad (10)$$

$$B = \sqrt{r_0^2 + r_c^2} \quad \text{و} \quad A = \frac{r_c}{\sqrt{r_0^2 + r_c^2}}$$

در رابطه (۱۰)،  $B$  فاصله رادار تا مرکز پره‌ها و  $A$  کسینوس زاویه خط واصل رادار و مرکز پره‌ها با محور  $x$  است. اگر این زاویه با  $\beta$  نشان داده شود،  $A$  برابر با  $\cos(\beta)$  می‌شود. بنابراین سیگنال بازگشتی از پراکنده‌ساز  $p$  برابر است با:

$$s_p(t) = \sigma(l_p) \exp\{j[2\pi f_0 t + \Phi_p(t)]\} \quad (11)$$

که در آن  $\sigma(l_p)$  ضریب انعکاس از نقطه  $p$  و  $\Phi_p(t)$  تابع فاز می‌باشد که برابر است:

$$\begin{aligned} \Phi_p(t) &= 2\pi f_0 \frac{2R_p(t)}{c} \\ &= 4\pi f_0 \frac{B + Al_p \cos(\Omega t + \theta_0)}{c} \end{aligned} \quad (12)$$

اگر رابطه (۱۱) به باند پایه برده شود، با فرض این که  $\sigma(l_p)$  برای همه نقاط پراکنده‌ساز مساوی و برابر با ۱ است، با انتگرال‌گیری روی طول پره خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} s_L(t) &= \int_0^l e^{j4\pi f_0 \frac{B + A l_p \cos(\Omega t + \theta_0)}{c}} dl_p \\ &= l e^{j4\pi f_0 \frac{B}{c}} e^{j\frac{2\pi f_0 A l}{c} \cos(\Omega t + \theta_0)} \\ &= \text{sinc}\left\{\frac{2\pi f_0 A l}{c} \cos(\Omega t + \theta_0)\right\} \end{aligned} \quad (13)$$

رابطه (۱۳) سیگنال بازگشتی از یک پره را نشان می‌دهد. در این رابطه علاوه بر جمله سینوسی با فاز سینوسی (یعنی فرکانس لحظه‌ای، سینوسی متغیر با زمان است) جمله‌ای به‌صورت سینک با آرگومانی دقیقاً برابر فاز جمله سینوسی دیده می‌شود. اگر بالگرد دارای  $N$  پره باشد، زاویه دوران اولیه برای هر پره از رابطه،

$$\theta_k = \theta_0 + \frac{k2\pi}{N}, \quad k = 0.1 \dots N-1 \quad (14)$$

و کل سیگنال بازگشتی از پره‌های بالگرد برابر است با [۶]:

$$\begin{aligned} s_R(t) &= L e^{j4\pi f_0 \frac{B}{c}} \sum_{k=0}^{N-1} e^{j\Phi_k(t)} \text{sinc}\{\Phi_k(t)\} \\ \Phi_k(t) &= \frac{4\pi L}{\lambda} \frac{1}{2} \cos(\beta) \cos(\Omega t + \theta_0 + \frac{k2\pi}{N}) \end{aligned} \quad (15)$$

<sup>۱</sup> Flash

<sup>۲</sup> Radar Cross Section

رابطه (۱۷) نکات زیر را در بر دارد:

۱- شیفت مایکروداپلر پریودیک و سینوسی است.

۲- دوره تناوب آن برابر دوره تناوب چرخش روتور است.

۳- دامنه متناسب با فاصله پراکنده‌ساز از مرکز روتور است.

لذا سرعت خطی نوک پره و بیشینه شیفت داپلر برابر است با:

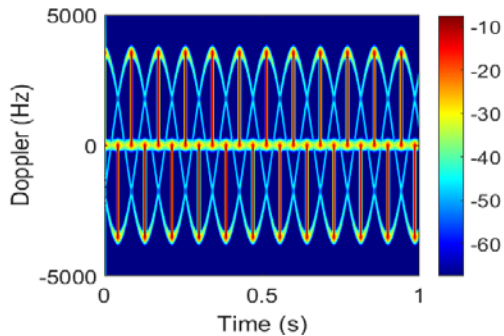
$$\begin{cases} V_{tip} = 2\pi\Omega L \\ f_{md-max} = \frac{1}{2\pi} \frac{2V_{tip} \cos(\beta)}{c} f_0 = \frac{2AL\Omega}{\lambda} \end{cases} \quad (18)$$

بنابراین طول پره می‌تواند از روی بیشینه داپلر ایجاد شده به‌دست آید به شرطی که بتوان سرعت دوران روتور را به درستی تخمین زد. با توجه به روابط (۱۶ و ۱۸) اگر تعداد پره بالگرد معلوم باشد، سرعت دوران روتور می‌تواند از روی دوره تناوب فلش‌های مایکروداپلر تخمین زده شود. در بخش ۳ به روش‌های تخمین مشخصه‌های پره بالگرد در حالت کلی اشاره خواهد شد.

### ۲-۳-۵- تحلیل طیف زمان-فرکانس بالگرد

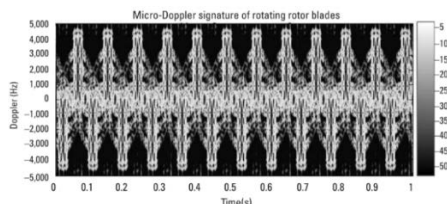
در شکل (۵) امضای مایکروداپلر یک بالگرد سه پره‌ای نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هر پره بالگرد، در یک دور دوران کامل روتور، یک دوره تناوب از الگوی سینوسی را ایجاد می‌کند و پره‌ها با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه نسبت به‌همدیگر قرار گرفته‌اند. از آنجا که سرعت زاویه‌ای دوران و طول پره‌ها برابر است، دوره اوب و دامنه سینوسی‌ها یکسان است. نکته مهم، وجود خطوط عمودی ناشی از فلش‌هاست که در هر قله و دره وجود دارد.

برای به‌دست آوردن سرعت دوران پره‌ها، باید فرکانس سینوسی‌ها استخراج شود. همچنین در رابطه (۱۸) دیده شد که دامنه سینوسی‌ها متناسب با طول پره است. بنابراین استخراج مشخصه‌های دامنه، فاز و فرکانس سینوسی به استخراج مشخصات بالگرد می‌انجامد.

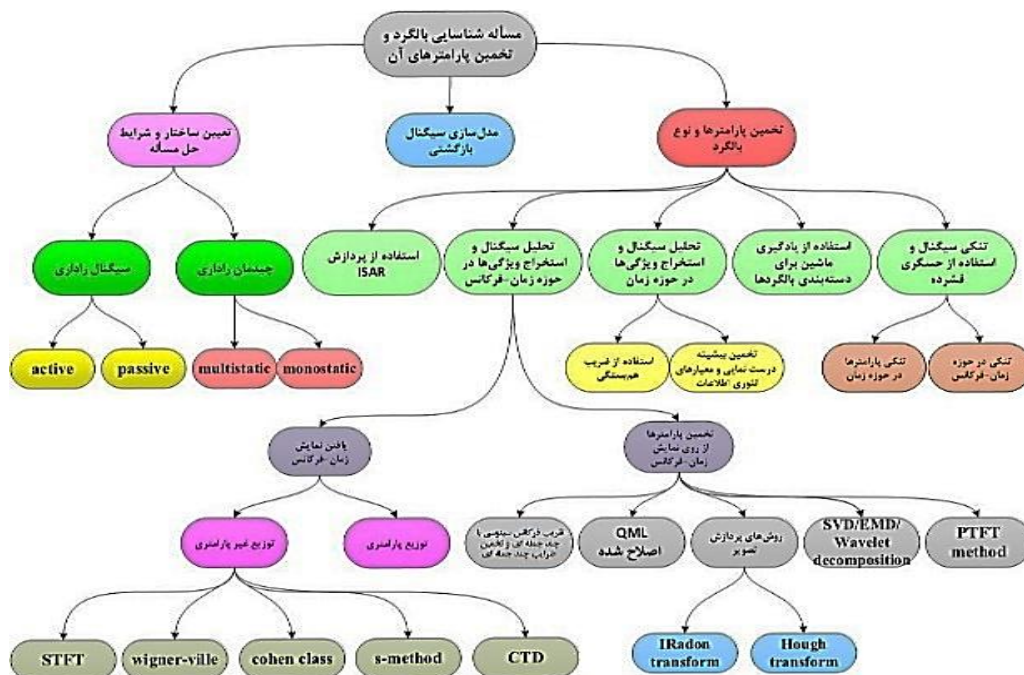


شکل (۵): امضای مایکروداپلر بالگرد سه پره‌ای.

در شرایط واقعی امضای مایکروداپلر با نویز و سایر اغتشاشات آمیخته است که انجام پیش پردازش را لازم می‌کند. شکل (۶) امضای مایکروداپلر یک بالگرد واقعی است. در این امضا سینوسی‌ها به‌وضوح دیده نمی‌شود، اما فلش‌ها پر قدرت ظاهر شده‌اند.



شکل (۶): امضای مایکروداپلر بالگرد واقعی [۶].



شکل (۷): دسته‌بندی روش‌های حل مسأله شناسایی بالگرد و تخمین مشخصه‌های آن.

### ۳-۲- مروری بر تحقیقات انجام شده در حوزه تخمین مشخصه‌های پره بالگرد

مباحثی که در مقالات تحقیقاتی در این حوزه مطرح شده است را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- تعیین ساختار و شرایط حل مسأله
- یافتن طرحی مناسب برای سیگنال بازگشتی
- استفاده از روش‌های تخمین مناسب برای مشخص نمودن مشخصه‌ها و نوع بالگرد

شکل (۷) نمودار کلی این دسته‌بندی را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- تعیین ساختار و شرایط حل مسأله

به‌طور کلی ساختاری که مراجع برای بررسی مسأله در نظر می‌گیرند، از لحاظ چیدمان راداری می‌تواند تک‌پایه [۶ و ۲۷]، دوپایه [۲۹] و یا چندپایه [۲۸ و ۳۰] باشد. از آن‌جا که ویژگی‌های حرکت هدف مانند سرعت شعاعی و جهت، وابسته به خط دید رادار است، لذا استفاده از چند رادار در مکان‌های مختلف، باعث افزایش میزان اطلاعات و بهبود تخمین می‌شود. البته بهبود در عملکرد رادار به عواملی مانند میزان همبستگی کانال‌های فضایی ایجاد شده توسط رادارها، تعداد رادارها، پیکر بندی کلی سامانه و نحوه ادغام داده بستگی دارد [۳۱]. همچنین، استفاده از سامانه راداری فعال [۶ و ۲۷] یا غیرفعال [۲۸ و ۲۹] از شرایطی است که مورد توجه قرار گرفته است. رادارهای غیرفعال از سیگنال‌های موجود در فضا مثل سیگنال‌های ماهواره‌ای که بعد از برخورد به هدف، به رادار می‌رسند، استفاده می‌کنند.

### ۳-۲- نمونه‌سازی

مراجع [۶، ۲۷] طرحی ساده برای چرخش پره‌های بالگرد به‌دست آورده و روابط مربوط به سیگنال بازگشتی از آن را استخراج کرده‌اند. این طرح که به طرح پراکنده‌ساز نقطه‌ای معروف است، کل پره بالگرد را به صورت خطی راست متشکل از نقاط پراکنده‌ساز، نمونه‌سازی می‌کند. روابط بخش ۲ نتایج این مقالات را نشان می‌دهند. در [۲۸]، علاوه بر استخراج طرح پره‌های روتور اصلی بالگرد، طرح پره‌های روی دم بالگرد نیز به‌دست آمده است.

### ۳-۳- تخمین مشخصه‌ها و نوع بالگرد

به‌طور کلی روش‌های تحلیل سیگنال بازگشتی در مقالات به پنج دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

۱- تحلیل و استخراج ویژگی‌ها در حوزه زمان

- ۲- تحلیل و استخراج ویژگی‌ها در حوزه زمان- فرکانس
- ۳- استفاده از حسگری فشرده برای تخمین مشخصه‌ها (در حوزه‌های زمان و زمان- فرکانس)
- ۴- استفاده از یادگیری ماشین برای دسته‌بندی بالگردها
- ۵- تشکیل تصاویر ISAR برای بالگرد و پره‌های آن

هرکدام از این پنج دسته را می‌توان به زیردسته‌هایی تقسیم‌بندی کرد که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

### ۳-۳-۱- تحلیل سیگنال و استخراج ویژگی در حوزه زمان

در [۳۳] از تخمین بیشینه درست‌نمایی ( $ML^1$ ) و معیارهای مبتنی بر نظریه اطلاعات  $AIC^2$  و  $MDL^3$  برای تعیین مشخصه‌ها استفاده شده است. در شرایط خاصی که نویز گوسی و سفید باشد، تخمین  $ML$  معادل یافتن سیگنال دارای بیشترین هم‌بستگی با سیگنال مشاهده در حوزه زمان می‌باشد. همچنین [۳۴] در هر دو حوزه زمان و زمان- فرکانس از طریق پیدا کردن سیگنال با بیشترین هم‌بستگی، مشخصه‌ها را به‌دست می‌آورد.

### ۳-۳-۲- تحلیل سیگنال و استخراج ویژگی‌ها در حوزه زمان- فرکانس

مراجع بسیاری از نمایش زمان- فرکانس برای تحلیل و استخراج مشخصات سیگنال استفاده می‌کنند، روش‌ها در این دسته بسیار متنوع‌اند و هرکدام سعی در تحلیل هرچه بهتر سیگنال بازگشتی دارند. در بخش ۲-۱-۲ تعدادی از روش‌های یافتن نمایش زمان- فرکانس معرفی و معایب و مزایای آن‌ها بررسی شد. در مسأله بالگرد فرکانس به‌صورت سینوسی است. یعنی درجه چندجمله‌ای آن بی‌نهایت است. بنابراین تمام این توزیع‌ها خطاهای مشتق فاز ایجاد می‌کنند. اما از نظر خطا روش ویگنرویل از STFT بهتر و CTD از ویگنرویل بهتر است زیرا با استفاده از تکنیک زمان مختلط خطاهای مشتقات فاز را تا درجات بالایی حذف می‌کند. اما از لحاظ سادگی، خطی بودن و عدم ایجاد ترم‌های تداخلی STFT مناسب است. بنابراین اکثر مقالات ترجیح می‌دهند با تحمل خطا و پهن شدن طیف و دقیق نبودن فرکانس در هر لحظه، از همان STFT استفاده کرده تا از جملات تداخلی هم در امان بمانند.

### تخمین مشخصه‌ها با استفاده از نمایش زمان- فرکانس

پس از یافتن نمایش زمان- فرکانس مناسب، نوبت به تخمین مشخصه‌های هدف می‌رسد. برای این کار الگوریتم‌های زیادی پیشنهاد شده است. برخی از آن‌ها به نمونه خاصی از سیگنال‌ها محدود شده و برخی دیگر کاربرد عام‌تری دارند.

<sup>1</sup> Maximum Likelihood

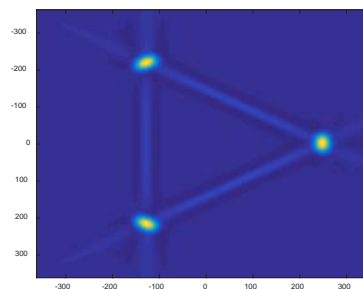
<sup>2</sup> Akaike Information Criterion

<sup>3</sup> Minimum Description Length

- روش‌های مبتنی بر پردازش تصویر:

دسته‌ای از روش‌های پیشنهاد شده برای تخمین مشخصه، از قابلیت‌های پردازش تصویر استفاده می‌کنند [۳۵-۳۷]. تبدیل رادون<sup>۱</sup> و تبدیل هاف<sup>۲</sup> از جمله الگوریتم‌هایی هستند که اشکال سینوسی یا خطوط را در داخل تصویر طیف زمان-فرکانس تشخیص می‌دهند. باید توجه داشت مجهولات مسأله شامل فرکانس سینوسی، دامنه و فاز آن است. اما سیگنالی که در عمل دریافت می‌شود، آغشته به نویز و کلاتر و دارای فلش‌های قدرتمند است و الگوی سینوسی به‌طور واضح در دسترس نیست.

تبدیل رادون یک نقطه، برابر با یک سینوسی در فضای رادون است. ویژگی این تبدیل آن است که دامنه سینوسی متناسب با فاصله نقطه متناظر از مبدأ و فاز اولیه آن متناسب با زاویه نقطه نسبت به محور افقی می‌باشد. بنابراین اگر روی یک سینوسی در فضای رادون، عکس تبدیل رادون اعمال شود، یک نقطه با مشخصات فوق به‌دست می‌آید. با اعمال معکوس تبدیل رادون روی توزیع زمان-فرکانس، می‌توان انتظار داشت سینوسی آغشته به نویز در فضای رادون، در یک نقطه دارای پیک باشد. برای هر جزء چرخان هدف، یک نقطه پیک در صفحه دوبعدی به‌دست می‌آید و بدین وسیله می‌توان اجزای مایکروداپلر را تفکیک و از طیف بدنه جدا کرد. با استخراج مشخصات نقطه پیک شامل فاصله آن از مبدأ و زاویه آن با محور افقی، مشخصه‌های متناظر در شکل سینوسی تخمین زده می‌شوند. فاصله نقطه از مرکز تصویر، دامنه سینوسی و در نتیجه طبق (۱۸) فرکانس بیشینه داپلر را مشخص می‌کند. تعداد پره‌ها نیز از روی تعداد نقاط یافت شده در صفحه معکوس تبدیل رادون، مشخص می‌شود. شکل (۸) نتیجه به‌دست‌آمده برای عکس تبدیل رادون یک سیگنال دارای سه مولفه با فرکانس سینوسی را نشان می‌دهد. متناظر با هر مولفه یک نقطه در تصویر ایجاد شده است.



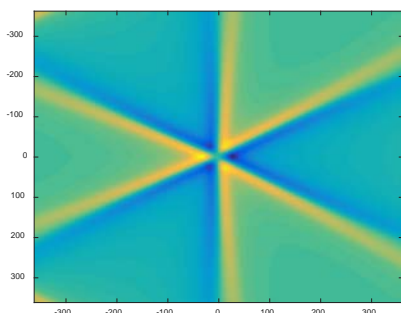
شکل (۸): تبدیل معکوس رادون برای سیگنال با ۳ مولفه.

این روش برای مسأله بالگرد دارای معایبی است:

یکی از این معایب عدم وجود نمایش فرکانس زمان-فرکانس ایده‌آل با قدرت تفکیک‌پذیری مناسب است. این ویژگی باعث

پهن شدن طیف زمان-فرکانس می‌شود و دقت تخمین در نویز بالا بسیار پایین می‌آید. همچنین در این روش، برای تخمین طول پره ابتدا فرکانس بیشینه داپلر تخمین زده می‌شود. برای به‌دست آوردن فرکانس بیشینه داپلر، نیاز به نرخ نمونه‌برداری نایکویست می‌باشد. یعنی باید نرخ نمونه‌برداری و تعداد نمونه بسیار بالا باشد. از این‌رو، زمان شبیه‌سازی این روش نیز بالا خواهد بود.

یکی دیگر از مشکلات این است که، چون عبارت سینک در سیگنال بالگرد وجود دارد، غیر از سینوسی‌ها خطوط عمودی (فلش‌ها) به‌صورت متناوب در تصویر وجود خواهد داشت. این خطوط می‌تواند در تشخیص فرکانس سینوسی‌ها، شمارش تعداد پره‌ها و تخمین طول پره ایجاد خطا کند. علاوه بر این مشخصه‌هایی برای تفکیک نقاط پیک در صفحه عکس رادون وجود دارند که باید برای هر مسأله به‌طور جداگانه تنظیم شوند و این موضوع در عملکرد این روش تأثیر منفی خواهد داشت. شکل (۹) استفاده از تبدیل رادون برای بالگرد ۳ پره‌ای را نشان می‌دهد که با وجود نرخ نمونه‌برداری ۱۵۰۰۰ نمونه در ثانیه و استفاده از حداقل ۵ دوره تناوب از سینوسی‌ها، باز هم طول پره نادرست تخمین زده می‌شود.



شکل (۹): تبدیل معکوس رادون برای سیگنال بالگرد با ۳ پره.

یکی دیگر از الگوریتم‌های پردازش تصویر که برای تخمین مشخصه به‌کار می‌رود، تبدیل هاف است [۳۶]. در این روش نیز با در نظر گرفتن بازه‌ای مشخص برای تعداد پره و سرعت زاویه‌ای دوران، تجمع خطوط تصویر محاسبه شده و در ماتریس هاف ذخیره می‌شود. سپس آن سرعت دوران و تعداد پره‌ای که تجمع خطوط بیشتری ایجاد کرده‌اند، به‌عنوان مشخصه صحیح انتخاب می‌شوند. این روش نیز در مواجهه با عبارت سینک دچار مشکل روش رادون می‌شود.

- تقریب فاز سیگنال با استفاده از چندجمله‌ای:

یک روش برای تخمین مشخصه‌های سیگنال در حوزه زمان-فرکانس این است که فرکانس سیگنال با یک چندجمله‌ای تقریب زده شود. روش‌های متعددی برای تخمین ضرایب چندجمله‌ای وجود دارند. از جمله این روش‌ها می‌توان به

<sup>۱</sup> Radon transform

<sup>۲</sup> Hough Transform



باید ابتدا فرایند جداسازی مولفه‌ها انجام گیرد. این کار ساده نیست و بسیاری از مراجع تلاش کرده‌اند که جداسازی مولفه‌ها در حوزه زمان-فرکانس انجام دهند. اکثر روش‌های جداسازی، برای مولفه‌هایی که در نمایش زمان-فرکانس متقاطع نیستند یا روی محور فرکانس هم‌پوشانی ندارند کاربرد دارند. پس از انتشار مرجع [۴۵]، نویسندگان آن روش QML-RANSAC را ارائه داده‌اند که برای تخمین مشخصه سیگنال‌های چندمولفه‌ای با تعداد مولفه‌های معلوم به کار می‌رود [۴۶]. اما در مسأله بالگرد تعداد مولفه‌های سیگنال که همان تعداد پره می‌باشد، نامعلوم است.

- برخی از مراجع از روش‌های تجزیه به مقادیر تکین (SVD)، روش تجزیه مود تجربی (EMD<sup>۸</sup>) و یا تبدیل موجک برای استخراج ویژگی‌های هدف با استفاده از امضای مایکروداپلر استفاده می‌کنند [۴۷-۴۹]. برای مثال مرجع شماره [۴۸]، با استفاده از تجزیه موجک سیگنال‌های بازگشتی از روتور اصلی بالگرد و روتور روی دم را تفکیک می‌کند.

در [۵۰] روشی دیگر برای تخمین فرکانس لحظه‌ای آمده است که روشی کلی است و برای هر نوع سیگنال با هر نوع فازی کاربرد دارد. در واقع برای انواع سیگنال‌ها (مربوط به حرکات مختلف چرخشی و انتقالی) یک طرح مشترک با پایه‌های فوریه استفاده شده است. در این مرجع مولفه‌ها ابتدا با روش ارائه شده در [۵۱] جدا شده و تخمین مشخصه برای هر مولفه با استفاده از تبدیل فوریه وابسته به مشخصه یا PTFT<sup>۹</sup> به دست می‌آید. در این تبدیل فوریه یک کرنل متناسب با سیگنال به دست می‌آید. اگر مشخصه‌های کرنل به خوبی به دست بیاید می‌تواند روی سیگنال منطبق شود. در پایان با به دست آوردن پوش مختلط سیگنال از اطلاعات فاز آن برای جبران خطای ایجاد شده در تخمین فرکانس استفاده می‌شود. در مسأله تخمین مشخصه بالگرد این روش بسیار پیچیده بوده و جداسازی مولفه‌ها هزینه محاسباتی زیادی دارد. از طرفی طرح سیگنال بالگرد کاملاً مشخص است و لزومی ندارد از تقریب کلی برای آن استفاده شود.

همانطور که گفته شد، ایرادی که در برخی از روش‌های تخمین مشخصه وجود دارد، جداسازی مولفه‌ها از یکدیگر است. روش‌های جداسازی مولفه نیز به دو روش وابسته به مشخصه و مستقل از مشخصه تقسیم می‌شود. در روش‌های وابسته به مشخصه مانند رادون و هاف، با توجه به طرح خاصی که برای فرکانس در نظر گرفته می‌شود، مولفه‌ها از هم جدا می‌شوند ولی در روش‌های مستقل از مشخصه مانند الگوریتم ویتربی، با دنبال کردن مسیر فرکانس در توزیع زمان-فرکانس، فرکانس لحظه‌ای

[۳۸ و ۳۹] HAF<sup>۱</sup>، [۴۰] PHAF<sup>۲</sup>، [۴۱] IGAF<sup>۳</sup>، CPF<sup>۴</sup> [۴۲] و [۴۳] QML<sup>۵</sup> اشاره کرد. اکثر روش‌های ذکر شده مرتبه چندجمله‌ای را از طریق مشتق فاز<sup>۶</sup> کاهش می‌دهند تا سیگنال به فاز مرتبه ۱ یعنی یک سینوسی مختلط برسد. فرکانس این سینوسی متناسب است با ضریب بزرگترین مرتبه چندجمله‌ای که می‌تواند با الگوریتم‌های تخمین فرکانس تخمین زده شود. بعد از تخمین ضریب بزرگترین مرتبه، سیگنال dechirp شده تا بالاترین ضریب حذف گردد. بقیه ضرایب به همین ترتیب تخمین زده می‌شوند تا در نهایت به ضریب کوچکترین مرتبه برسد. اشکال این روش، انتشار خطا از هر مرحله به مرحله بعد است، به طوری که دقت روش پایین و آستانه سیگنال به نویز آن بالا است. از طرفی برای سیگنال با فاز سینوسی نیاز به در نظر گرفتن مراتب بالای چندجمله‌ای است تا تقریب خوبی حاصل شود. البته باید اشاره شود که روش QML برای تخمین مشخصه‌های چندجمله‌ای از الگوریتم ذکر شده استفاده نمی‌کند بلکه همزمان ضرایب را تخمین می‌زند و از انتشار خطا مصون می‌ماند [۴۴]. روش QML اصلاح شده در [۴۵] از فرض سینوسی بودن سیگنال بازگشتی استفاده می‌کند و نتیجه خوبی برای سیگنال تک مولفه دارد. این روش برای تخمین مشخصه سیگنال‌ها با فاز چندجمله‌ای استفاده می‌شود [۴۴]. مراحل الگوریتم به صورت خلاصه به شرح زیر است:

- ۱- به دست آوردن STFT سیگنال با طول‌های مختلف پنجره.
- ۲- تخمین فرکانس لحظه‌ای از طریق محاسبه بیشینه اندازه STFT برای هر طول پنجره.
- ۳- به دست آوردن تخمین اولیه برای مشخصه‌ها با کمک فرکانس لحظه‌ای سینوسی شکل.
- ۴- مرحله اصلاح<sup>۷</sup> تخمین ضرایب و به دست آوردن مشخصه‌های بهبود داده شده: در این مرحله سیگنال مشاهده در مزدوج سیگنال با تخمین اولیه ضرب شده و dechirp می‌شود. سپس فاز سیگنال dechirp شده به دست می‌آید و با فاز تخمین زده شده در قسمت قبل جمع می‌شود.
- ۵- چندبار تکرار مرحله قبل و رسیدن به تخمین نهایی مشخصه‌ها
- ۶- انتخاب پنجره با طول بهینه با روش بیشینه درست‌نمایی.

برای این‌که بتوان با استفاده از این روش تخمین، مشخصه‌های هر مولفه سیگنال را به طور جداگانه به دست آورد،

<sup>۱</sup> High-order Ambiguity Function

<sup>۲</sup> Product HAF

<sup>۳</sup> The Integrated Generalized Ambiguity Function

<sup>۴</sup> Cubic Phase Function

<sup>۵</sup> Quasi-Maximum-Likelihood

<sup>۶</sup> Phase Differentiation

<sup>۷</sup> Refinement

<sup>۸</sup> Empirical Mode Decomposition

<sup>۹</sup> Parameterized Time-Frequency Transform

### ۳-۳-۵- تشکیل تصاویر ISAR برای بالگرد

رادارهای دهانه مصنوعی معکوس (ISAR) قادرند که از اجسام متحرک هوایی تصویربرداری کرده و مشخصات هدف را نمایش دهند. امروزه تحقیقات زیادی بر روی این رادارها صورت گرفته است [۵۵]. در این روش اگر بتوان به تصویر خوبی از پره‌ها دست یافت، می‌توان تعداد و طول پره‌ها را به‌خوبی تخمین زد [۲۸].

### ۴- روش حسگری فشرده در حوزه زمان

در این الگوریتم‌ها مشخصه‌های مجهول سیگنال شامل طول پره، فرکانس دوران و فاز اولیه دوران در بازه‌ای گسسته (توری) <sup>۱</sup>، تنک فرض شده و با ایجاد ماتریس لغت‌نامه در حوزه زمان، مشخصه‌ها تخمین زده می‌شوند. بدین وسیله می‌توان تعداد محدودی پایه متناظر با هر کدام از مشخصه‌ها تعریف نمود. در مرجع شماره [۵۶] از روشی به اسم بازبازی تنک مشخصه‌ای <sup>۲</sup> برای تخمین مشخصه‌های میکروداپلر هدف با چرخش مخروطی استفاده شده است. حرکت شیء مخروطی ماهیت متفاوتی از چرخش پره‌های بالگرد دارد و دارای حرکات پیچ، رول و لرزش است اما در این مرجع طرح ساده‌ای در نظر گرفته شده است که جسم، دارای نقاط پراکنده‌ساز محدودی با سرعت زاویه‌ای دوران یکسان و زوایای متفاوت است. رابطه‌ای که برای سیگنال بازگشتی از جسم مخروطی به‌دست می‌آید، مشابه سیگنال بازگشتی از پره‌های بالگرد و هر دو مجموع چند مولفه نمایشی مختلط هستند، با این تفاوت که جمله سینک در مولفه‌های مربوط به چرخش مخروطی وجود ندارد. زیرا جمله سینک به علت انتگرال‌گیری از تمام نقاط پراکنده‌ساز در طول هر پره به‌وجود می‌آید. همچنین برخلاف مسأله چرخش مخروط که تعداد نقاط پراکنده‌ساز مجهول مسأله نیست، در مسأله بالگرد تعداد مولفه‌ها یا همان تعداد پره‌ها مجهول است و باید تخمین زده شود.

ایده اصلی بازبازی تنک مشخصه‌ای این است که، سیگنال به مولفه‌هایش (یعنی سیگنال مربوط به هر پره) تجزیه شده و هر مولفه یک پایه از فضا را نشان دهد. از آنجا که سرعت زاویه‌ای دوران برای همه مولفه‌ها یکسان است، برای هر داوطلب سرعت زاویه‌ای در توری، یک فضای برداری با پایه‌های متشکل از تمام حالات ممکن یک مولفه از سیگنال (که با توری‌های زاویه اولیه دوران و طول پره‌ها ایجاد می‌شوند) ساخته می‌شود. هر ستون این لغت‌نامه (هر اتم لغت‌نامه) به فرم نمونه‌های زمانی یک مولفه از سیگنال است. برای مثال اگر  $K$  تعداد داوطلب‌های سرعت زاویه‌ای در توری مربوط به آن باشد، به‌ازای هر داوطلب یک

تخمین زده می‌شود [۵۱]. سپس برای جداسازی صحیح مولفه‌ها در نقاط تقاطع، در این نواحی درون‌یابی صورت می‌گیرد تا در روند دنبال کردن مسیر هر مولفه، مولفه‌ها به‌جای هم انتخاب نشوند. پیچیدگی محاسباتی و عدم دقت در این روش باعث می‌شود که از این روش‌ها برای سیگنال مورد نظر استفاده نشود زیرا با توجه به مشخص بودن طرح سیگنال بالگرد، می‌توان از الگوریتم‌های هوشمندتری استفاده کرد.

### ۳-۳-۳- روش حسگری فشرده و فرض تنکی سیگنال

پردازش سیگنال با استفاده از حسگری فشرده امروزه در بسیاری از زمینه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در حوزه پردازش میکروداپلر نیز، با در نظر گرفتن سیگنال به‌صورت تنک در حوزه زمان یا حوزه زمان-فرکانس، از این قابلیت استفاده شده و الگوریتم‌هایی بر این مبنا ارائه شده‌اند [۵۲ و ۵۳]. بر این اساس الگوریتم‌های حسگری فشرده به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

- فرض تنکی مشخصه‌های سیگنال در حوزه زمان:

در این الگوریتم‌ها مشخصه‌های سیگنال مانند دامنه، فرکانس و فاز سیگنال در بازه‌ای گسسته، تنک فرض شده و با ایجاد ماتریس لغت‌نامه در حوزه زمان، مشخصه‌ها تخمین زده می‌شوند. در بخش ۵ این روش مورد بحث قرار خواهد گرفت.

- فرض تنکی سیگنال در حوزه زمان-فرکانس:

در روش‌های زمان-فرکانس، هدف به‌دست آوردن طیف زمان-فرکانس باریک و ایده‌آل با تفکیک‌پذیری بالا می‌باشد. برخی از مراجع از حسگری فشرده برای به‌دست آوردن توزیع زمان-فرکانس استفاده می‌کنند. یعنی فرض می‌کنند در هر لحظه از زمان، طیف فرکانسی تنک است و سعی می‌کنند که روش‌های زمان-فرکانس مانند ویگنرویل را به‌حالت ایده‌آل نزدیک‌تر کنند و به نمایشی باریک و بدون ترم‌های اضافی دست یابند [۱۹ و ۲۰]. در این مراجع، ماتریس معکوس تبدیل فوریه دوبعدی به‌عنوان ماتریس لغت‌نامه در مسأله حسگری فشرده در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از بهینه‌سازی یا الگوریتم OMP طیفی بسیار تنک به‌دست‌آید. البته پس از یافتن نقاط تنک در راستای فرکانس باید کل طیف به‌صورت یکپارچه در زمان به‌دست بیاید تا بتوان به استخراج مشخصه‌های سینوسی پرداخت.

### ۳-۳-۴- استفاده از یادگیری ماشین

یکی از روش‌هایی که از آن برای دسته‌بندی بالگردها و پهپادها استفاده می‌شود، یادگیری ماشین است. مراجعی چون [۵ و ۵۴]، از این روش برای تشخیص و دسته‌بندی بالگردها استفاده نموده‌اند. برای این روش‌ها نیاز به مجموعه داده بسیار وسیع از انواع بالگرد می‌باشد.

<sup>1</sup> Grid

<sup>2</sup> Parametric Sparse Recovery

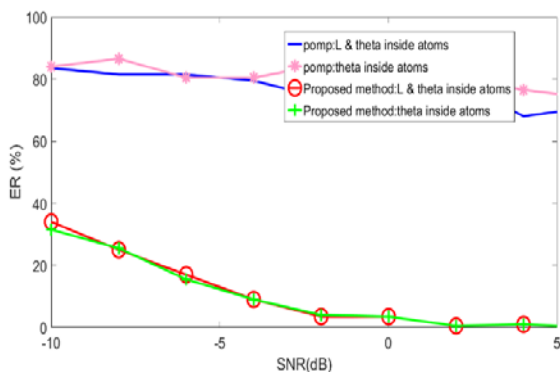
نوع هدف محسوب نمی‌شوند ضمناً فاز اولیه مولفه‌های نمایی مختلط ارتباط معناداری با تعداد مولفه‌ها ندارد، ولی در مسأله بالگرد تعداد مولفه‌ها تعداد پره‌ها را معین می‌کند که رابطه مستقیمی با فاز اولیه مولفه‌های نمایی مختلط دارد. همچنین ایراد دیگر به‌کارگیری این روش‌ها برای مسأله بالگرد این است که به‌علت وجود عبارت سینک در مولفه‌های سیگنال، شرط تعامد ستون‌ها برقرار نیست و بین ستون‌ها همبستگی بالایی وجود دارد و این مسأله خطای تخمین را بالا خواهد برد زیرا در اجرای الگوریتم OMP، در هر مرحله با انتخاب یک ستون از ماتریس و حذف اثر آن از سیگنال، ستون‌های دیگری که با این ستون همبسته بوده‌اند عملاً امکان انتخاب شدن در مراحل بعدی را از دست خواهند داد. اما اگر اتم‌ها کاملاً بر هم عمود بود، با پیش رفتن مراحل الگوریتم تا رسیدن به تعداد واقعی پره‌ها، بردار تنک تخمین زده می‌شد و با شمارش مکان‌های غیرصفر بردار، تعداد پره‌ها به‌دست می‌آمد ولی وجود همبستگی، شمارش تعداد پره‌ها را با مشکل مواجه می‌کند.

در اینجا برای تخمین مشخصه‌های بالگرد با الهام از رویکرد فوق روشی با نتیجه تخمین بهتر و با حجم محاسباتی کمتر پیشنهاد می‌شود. در این روش که عملاً یک روش ML می‌باشد، برای تشکیل لغت‌نامه به‌جای این‌که هر ستون آن به‌فرم نمونه‌های زمانی یک مولفه از نمایی مختلط سیگنال باشد، در هر ستون با فرض تعداد پره معلوم، مجموع مولفه‌های نمایی مختلط یعنی رابطه (۱۳) را به‌عنوان یک اتم معرفی می‌نماییم که به‌جای مشخصه‌های طول پره، تعداد پره، سرعت زاویه‌ای و زاویه اولیه دوران، مقادیر روی توری‌ها قرار داده شده است. حال ستون‌های مختلف لغت‌نامه را برای همه تعداد پره‌های بالگرد ممکن (۲ تا ۸)، زوایای اولیه مختلف دوران و مقادیر مختلف طول پره تشکیل می‌دهیم. به این ترتیب اگر بالگرد دارای ۲ پره باشد، زاویه اولیه مربوط به پره اول بین ۰ تا ۱۸۰ درجه و زاویه اولیه مربوط به پره دیگر ۱۸۰ درجه بیشتر خواهد بود. برای مثال اگر درجه‌بندی زاویه ۱ درجه‌ای باشد، نیاز به  $180 \times L$  ستون برای ساختن سیگنالی دومولفه‌ای و با زاویه اولیه بین ۰ تا ۱۸۰ خواهیم داشت. برای بالگرد با ۳ پره، زاویه اولیه یکی از پره‌ها بین ۰ تا ۱۲۰ درجه است و دو پره دیگر همین زاویه اولیه را با اختلاف ۱۲۰ و ۲۴۰ درجه خواهند داشت. بنابراین در ماتریس نیاز به  $120 \times L$  ستون برای تشکیل تمام حالات ممکن سیگنال‌های ۳ مولفه‌ای خواهیم داشت. به‌همین ترتیب برای ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ پره به‌ترتیب نیاز به ( $45, 52, 60, 72, 90 \times L$ ) ستون، برای تشکیل لغت‌نامه داریم. البته اگر درجه‌بندی زاویه ریزتر انجام شود، تعداد ستون‌ها به همان نسبت بیشتر می‌شود. تعداد ستون‌ها در این روش  $619 \times L$  می‌باشد و نسبت به تعداد ستون‌های روش قبل

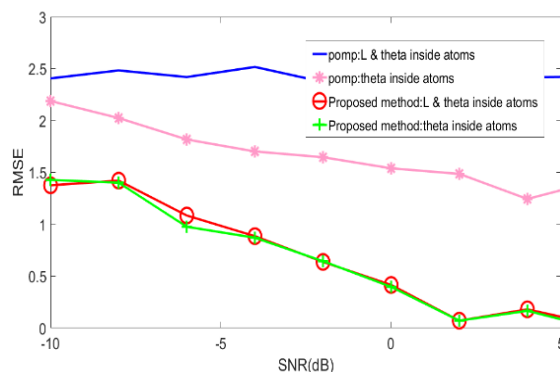
ماتریس تشکیل می‌شود. یعنی K ماتریس تشکیل می‌شود. فرض کنید ماتریس لغت‌نامه  $k \times m$  مربوط به سرعت زاویه‌ای  $\omega_k$  باشد. برای تشکیل این ماتریس، مقدار  $\omega_k$  در طرح سیگنال بازگشتی از بالگرد جایگذاری می‌شود. حال اگر توری مربوط به طول پره دارای  $L$  مقدار مختلف باشد و توری زاویه اولیه نیز  $M$  مقدار به خود اختصاص دهد، در مجموع  $M \times L$  حالت مختلف برای سیگنال بازگشتی وجود دارد. پس لغت‌نامه دارای  $M \times L$  ستون می‌باشد. مثلاً اگر توری زاویه دارای ۳۶۰ مقدار به فواصل ۱ درجه باشد، تعداد ستون‌ها  $360 \times L$  خواهد بود. اما از بین این ستون‌ها فقط ستون‌هایی که دارای مقدار واقعی طول پره و زاویه اولیه دوران هستند، در تشکیل سیگنال واقعی نقش دارند، بنابراین لازم است که فقط به تعداد مولفه‌های سیگنال از تمام این حالات ممکن انتخاب شود. در نتیجه بردار تنک، در مکان‌هایی که ستون متناظر با آن در ماتریس لغت‌نامه با یک مولفه از سیگنال منطبق شود، مقدار غیرصفر خواهد داشت. با مشخص شدن مکان ضرایب غیرصفر، طول پره و زاویه اولیه دوران آن به‌دست می‌آید. در [۵۶] بعد از این‌که برای همه لغت‌نامه‌های مربوط به مقادیر مختلف سرعت زاویه‌ای، الگوریتم OMP اجرا شد و طول پره تخمین زده شد، با استفاده از مفهوم آن‌تروپی، سرعتی که دارای آن‌تروپی کمتری است به‌عنوان تخمین سرعت انتخاب می‌شود. با توجه به تعداد بالای داوطلب‌های سرعت و زمان‌بر بودن این روش، در [۵۷] از الگوریتم جستجوی تطابقی متعامد هرس شده یا POMP<sup>۱</sup> استفاده شده است. به این صورت که الگوریتم OMP به‌طور همزمان برای همه لغت‌نامه‌ها اجرا می‌شود. در مرحله اول این الگوریتم، برای همه داوطلب‌های سرعت، یک اتم از هر لغت‌نامه انتخاب می‌شود و بردار باقی‌مانده مربوط به هر لغت‌نامه به‌روزرسانی می‌شود. در هر مرحله نصف داوطلب‌های سرعتی که دارای نرم باقی‌مانده بیشتری هستند، حذف می‌شوند. الگوریتم برای نصف دیگر ادامه می‌یابد. این روند تا جایی جلو می‌رود که تعداد داوطلب‌های سرعت زاویه‌ای به یک برسد و آن داوطلب به‌عنوان تخمین نهایی انتخاب می‌شود. این روش برای مسأله چرخش مخروطی بسیار مناسب است زیرا در هر مرحله از الگوریتم، یک اتم مربوط به یک نقطه پراکنده‌ساز انتخاب می‌شود و حتی بعد از تخمین سرعت زاویه‌ای دوران می‌توان الگوریتم را ادامه داد تا همه نقاط پراکنده‌ساز اصلی به‌دست بیایند. اگر تعداد نقاط پراکنده‌ساز معلوم نباشند، این کار با مقایسه نرم باقی‌مانده با یک آستانه و تعریف کردن یک شرط توقف برای پایان عملیات انجام می‌شود. اما در مسأله تخمین مشخصه‌های بالگرد این روش مخصوصاً در نویز بالا با خطا همراه است. در مسائل طرح شده در [۵۶ و ۵۷] تعداد ضرایب غیرصفر جزء مشخصه‌های اصلی تعیین

<sup>۱</sup> Pruned Orthogonal Matching Pursuit

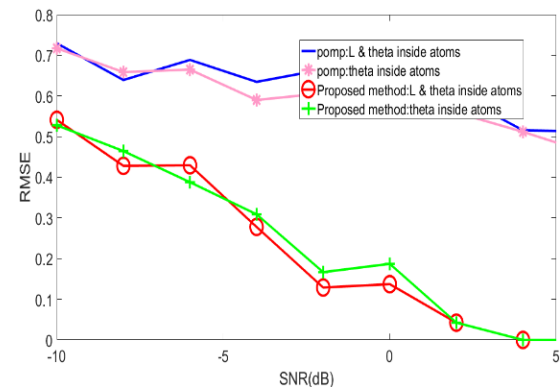
آمده با مشخصه‌های انتخابی مقایسه می‌شود. در هر کدام از شکل‌ها، دو نمودار آبی و صورتی مربوط به روش اول هستند که نمودار آبی با قرار دادن مشخصه طول پره داخل لغت‌نامه و صورتی با وابسته کردن لغت‌نامه برحسب آن مشخصه به‌دست آمده‌اند. دو نمودار قرمز و سبز مربوط به روش دوم هستند که به‌همین ترتیب ایجاد شده‌اند. مشاهده می‌شود که روش دوم در حدود  $SNR = 5 \text{ dB}$  به خطای صفر می‌رسد. در حالی که استفاده از روش اول یعنی تشکیل اتم‌ها به‌فرم مولفه‌های سیگنال، نتیجه مطلوبی ندارد. بنابراین روش دوم برای بالگرد بسیار کارآمدتر است.



شکل (۱۰): نمودار نرخ خطا برحسب SNR برای تعداد پره.



شکل (۱۱): نمودار RMSE برحسب SNR برای طول پره.



شکل (۱۲): نمودار RMSE برحسب SNR برای سرعت دوران پره.

در ادامه چند نکته وجود دارد:

- بعضی از مراجع به‌جای به‌دست آوردن زاویه اولیه دوران، از

که هر اتم را صرفاً شامل یک مولفه نمایی مختلط می‌دانست، بیشتر است (کمتر از دو برابر). اما مساله مهم این است که در این روش زمان کل شبیه‌سازی و پیچیدگی بسیار کمتر خواهد بود. زیرا با انتخاب اولین ستون، الگوریتم OMP متوقف خواهد شد و دیگر نیازی به الگوریتم POMP هم نیست. این انتخاب هم‌زمان تعداد پره، زاویه اولیه و طول پره را مشخص می‌کند. بنابراین، این الگوریتم فقط یک‌بار برای همه لغت‌نامه‌ها تکرار می‌شود و در همان اولین تکرار، با مشخص کردن سرعت دورانی که دارای باقی‌مانده کمتری است، این مشخصه نیز تخمین زده می‌شود. عدم تعامد ستون‌ها، یکی از اصلی‌ترین عوامل پایین آمدن کیفیت تخمین در روش حسگری فشرده است. این روش به‌دلیل تک مرحله‌ای بودن و ادامه نیافتن الگوریتم OMP، در برابر عدم تعامد ستون‌ها نیز مقاوم هستند و این موضوع باعث بهبود کیفیت تخمین می‌شود.

نکته‌ای دیگر این است که چون مشخصه طول پره نیز برای همه مولفه‌ها یکسان است، می‌تواند مانند سرعت زاویه‌ای از لغت‌نامه بیرون کشیده شود و برای هر داوطلب طول پره، الگوریتم تکرار شود. این کار به کوچک شدن ابعاد لغت‌نامه‌ها کمک می‌کند.

برای شبیه‌سازی روش‌های بیان شده، ابتدا لغت‌نامه مربوط به هر روش ساخته می‌شود. لغت‌نامه‌ها با استفاده از توری‌های دلخواه تولید می‌شود. برای مثال برای طول پره و سرعت زاویه‌ای، بازه گسسته  $[0.2: 0.5]$  و نرخ نمونه‌برداری از سیگنال برابر  $3000 \frac{\text{sample}}{\text{sec}}$  انتخاب شد. این نرخ بسیار پایین‌تر از نرخ نایکویست است ولی به‌دلیل این‌که سیگنال، یک سیگنال تنک دارای باند وسیع می‌باشد، روش مبتنی بر حسگری فشرده می‌تواند در نرخ کمتر از نرخ نایکویست به تخمین مشخصه‌های سیگنال بپردازد. همچنین تنها ۶۰۰ نمونه از سیگنال برای شبیه‌سازی استفاده شد. شکل (۱۰) نرخ خطا (تعداد خطا در هر ۱۰۰ آزمایش) برای تعداد پره و شکل‌های (۱۱ و ۱۲) جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای طول و سرعت زاویه‌ای دوران پره را برحسب SNR برای هر دو روش نشان می‌دهند. رابطه RMSE به شکل زیر است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (19)$$

که  $N$  تعداد دفعات آزمایش و  $x_i - \hat{x}_i$  اختلاف مقدار واقعی مشخصه با مقدار تخمین زده شده در آزمایش  $i$ ام است. برای هر مقدار SNR الگوریتم ۲۰۰ بار تکرار می‌شود. در هر بار تکرار، مشخصه‌ها به‌صورت تصادفی از توری‌های مورد نظر انتخاب شده و سیگنال مشاهده تشکیل می‌گردد. سپس تخمین‌های به‌دست

<sup>1</sup> Root Mean Square Error

- [3] V. C. Chen, D. Tahmoush, and W. J. Miceli, *Radar Micro-Doppler Signatures*. Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [4] Y. Kim and H. Ling, "Human activity classification based on micro-Doppler signatures using a support vector machine," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 5, pp. 1328–1337, 2009.
- [5] P. Molchanov, R. I. A. Harmanny, J. J. M. de Wit, K. Egiazarian, and J. Astola, "Classification of small UAVs and birds by micro-Doppler signatures," *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 6, no. 3–4, pp. 435–444, 2014.
- [6] V. C. Chen, *The micro-Doppler effect in radar*. Artech House, 2011.
- [7] Y. Kim and T. Moon, "Human detection and activity classification based on micro-Doppler signatures using deep convolutional neural networks," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 13, no. 1, pp. 8–12, 2015.
- [8] Y. Kim and B. Toomajian, "Hand gesture recognition using micro-Doppler signatures with convolutional neural network," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 7125–7130, 2016.
- [9] D. P. Fairchild and R. M. Narayanan, "Classification of human motions using empirical mode decomposition of human micro-Doppler signatures," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 8, no. 5, pp. 425–434, 2014.
- [10] W. D. Van Eeden, J. P. De Villiers, R. J. Berndt, W. A. J. Nel, and E. Blasch, "Micro-Doppler radar classification of humans and animals in an operational environment," *Expert Syst. Appl.*, vol. 102, pp. 1–11, 2018.
- [11] X. Li, Y. Huang, K. Yin, and Y. Qiao, "Classification of Vehicles with High-Speed Airborne Radar Based on Micro-Doppler Signatures," *IETE Tech. Rev.*, vol. 35, no. 2, pp. 180–189, 2018.
- [12] B. Erol, M. G. Amin, and S. Z. Gurbuz, "Automatic data-driven frequency-warped cepstral feature design for micro-Doppler classification," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 54, no. 4, pp. 1724–1738, 2018.
- [13] Z. Zhang, P. Pouliquen, A. Waxman, and A. G. Andreou, "Acoustic micro-Doppler gait signatures of humans and animals," in *2007 41st Annual Conference on Information Sciences and Systems*, 2007, pp. 627–630.
- [14] R. M. Narayanan and M. Zenaldin, "Radar micro-Doppler signatures of various human activities," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 9, no. 9, pp. 1205–1215, 2015.
- [15] C. E. Rotander and H. Von Sydow, "Classification of helicopters by the L/N-quoutient," *Radar Syst. (RADAR 97)*, pp. 629 – 633, 1997.
- [16] S.-H. Yoon, B. Kim, and Y.-S. Kim, "Helicopter classification using time-frequency analysis," *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 22, pp. 1871–1872, 2000.
- [17] Y. Yang, Z. K. Peng, X. J. Dong, W. M. Zhang, and G. Meng, "General parameterized time-frequency transform," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 11, pp. 2751–2764, 2014.
- [18] T. Claasen and W. F. G. Mecklenbrauker, "The Wigner distribution—A tool for time-frequency signal analysis," *Philips J. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 217–250, 1980.
- [19] I. Orović, S. Stanković, and T. Thayaparan, "Time-frequency-based instantaneous frequency estimation of sparse signals from incomplete set of samples," *IET Signal Process.*, vol. 8, no. 3, pp. 239–245, 2014.

شیوه سنکرون سازی سیگنال برای حذف اثر آن استفاده می کنند [۳۴ و ۵۸]. در این روش محل اولین فلش موجود در سیگنال زمانی را پیدا کرده و مرجع زمان  $t=0$  را به آن نقطه منتقل می کنند و به این ترتیب یک مجهول کاهش می یابد و ابعاد ماتریس لغت نامه کوچک می شود. البته می توان نشان داد خطای کوچکی در تخمین زمان شروع، منجر به ایجاد خطا در تخمین مشخصه های دیگر مثل سرعت زاویه ای و طول پره می شود.

می توان با توجه به ویژگی متناوب بودن سیگنال، با استفاده از تابع خود همبستگی سیگنال دریافتی و محاسبه فاصله پیک های آن، دوره تناوب فلش ها را حساب نمود [۳۳ و ۳۴]. با داشتن دوره تناوب فلش ها برای هر فرضیه تعداد پره در اتم های لغت نامه، سرعت دوران قابل جایگذاری بوده و دیگر نیاز به تخمین جداگانه سرعت دوران نیست.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله سیگنال مایکروداپلر بازگشتی از پره های بالگرد تحلیل و بررسی شد. ابتدا پدیده داپلر و مایکروداپلر معرفی گردید و روابط مربوط به سیگنال بازگشتی از بالگرد استخراج شد. این سیگنال در حوزه های زمان، فرکانس و زمان-فرکانس مورد تحلیل قرار گرفت. تحلیل سیگنال مایکروداپلر کمک می کند که بتوان به روش های مناسب برای تخمین مشخصه و استخراج ویژگی های سیگنال دست یافت. در بخش سوم مرور و دسته بندی تحقیقات انجام گرفته در حوزه بالگرد و تخمین مشخصه های آن انجام شد. یکی از روش های تخمین مشخصه در حوزه زمان، استفاده از حسگری فشرده است. این روش شرح داده شد و برای دستیابی به تخمینی کارآمد، روشی معرفی شد. در این روش مشخصه های بالگرد روی توری مشخصی در نظر گرفته شده و بر اساس آن ستون های ماتریس لغت نامه به فرم نمونه های زمانی سیگنال بازگشتی از پره ها تشکیل شدند. با استفاده از الگوریتم OMP، مقدار مشخصه ها با انتخاب ستونی از ماتریس که بیشترین همبستگی با سیگنال را دارد تخمین زده شدند. نمودارهای خطا بر حسب SNR برای مشخصه ها، نشان دهنده دستیابی به روشی مناسب برای تخمین آن ها می باشد.

## ۶- مراجع

- [1] R. Zhang, G. Li, and Y. D. Zhang, "Micro-Doppler interference removal via histogram analysis in time-frequency domain," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 52, no. 2, pp. 755–768, 2016.
- [2] L. Stankovic, T. Thayaparan, M. Dakovic, and V. Popovic-Bugarin, "Micro-Doppler removal in the radar imaging analysis," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 49, no. 2, pp. 1234–1250, 2013.

- [35] L. Cirillo, A. Zoubir, and M. Amin, "Parameter estimation for locally linear FM signals using a time-frequency Hough transform," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 9, pp. 4162–4175, 2008.
- [36] H. Yildiz, "Parameter estimation of multicomponent micro-Doppler signals," PhD thesis, Middle East technical University, 2014.
- [37] L. Stankovic, M. Dakovic, T. Thayaparan, and V. Popovic-Bugarin, "Inverse radon transform--based micro-doppler analysis from a reduced set of observations," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 51, no. 2, pp. 1155–1169, 2015, doi: 10.1109/TAES.2014.140098.
- [38] S. Peleg and B. Friedlander, "The discrete polynomial-phase transform," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 43, no. 8, pp. 1901–1914, 1995.
- [39] B. Porat and B. Friedlander, "Asymptotic statistical analysis of the high-order ambiguity function for parameter estimation of polynomial-phase signals," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 42, no. 3, pp. 995–1001, 1996.
- [40] S. Barbarossa, A. Scaglione, and G. B. Giannakis, "Product high-order ambiguity function for multicomponent polynomial-phase signal modeling," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 46, no. 3, pp. 691–708, 1998.
- [41] S. Barbarossa and V. Petrone, "Analysis of polynomial-phase signals by the integrated generalized ambiguity function," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 45, no. 2, pp. 316–327, 1997.
- [42] P. O'shea, "A new technique for instantaneous frequency rate estimation," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 9, no. 8, pp. 251–252, 2002.
- [43] P. O'shea, "A fast algorithm for estimating the parameters of a quadratic FM signal," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 385–393, 2004.
- [44] I. Djurović and L. Stanković, "Quasi-maximum-likelihood estimator of polynomial phase signals," *IET Signal Process.*, vol. 8, no. 4, pp. 347–359, 2013, doi: 10.1049/iet-spr.2013.0104.
- [45] I. Djurovic, V. Popovic-Bugarin, M. Simeunovic, I. Djurović, V. Popović-Bugarin, and M. Simeunović, "The STFT-based estimator of micro-Doppler parameters," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 53, no. 3, pp. 1273–1283, 2017, doi: 10.1109/TAES.2017.2669741.
- [46] I. Djurović and I. Djurović, "QML-RANSAC instantaneous frequency estimator for overlapping multicomponent signals in the time-frequency plane," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 25, no. 3, pp. 447–451, 2018, doi: 10.1109/LSP.2018.2795554.
- [47] J. J. M. De Wit, R. I. A. Harmanny, and P. Molchanov, "Radar micro-Doppler feature extraction using the singular value decomposition," in *2014 International Radar Conference*, 2014, pp. 1–6.
- [48] T. Thayaparan, S. Abrol, E. Riseborough, L. J. Stankovic, D. Lamothe, and G. Duff, "Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 1, no. 4, pp. 289–299, 2007.
- [49] B.-S. Oh, X. Guo, F. Wan, K.-A. Toh, and Z. Lin, "Micro-Doppler mini-UAV classification using empirical-mode decomposition features," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 15, no. 2, pp. 227–231, 2017.
- [20] I. Orović, A. Draganić, and S. Stanković, "Sparse time--frequency representation for signals with fast varying instantaneous frequency," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 9, no. 9, pp. 1260–1267, 2015.
- [21] S. Stankovic and L. J. Stankovic, "Introducing time-frequency distribution with a 'complex-time' argument," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 14, pp. 1265–1267, 1996.
- [22] L. Stankovic, "Time-frequency distributions with complex argument," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, no. 3, pp. 475–486, 2002.
- [23] I. Orovic, M. Orlandic, S. Stankovic, and Z. Uskokovic, "A virtual instrument for time-frequency analysis of signals with highly nonstationary instantaneous frequency," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 3, pp. 791–803, 2010.
- [24] R. Ricci and A. Balleri, "Recognition of humans based on radar micro-Doppler shape spectrum features," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 9, no. 9, pp. 1216–1223, 2015.
- [25] Y. Li, L. Du, and H. Liu, "Hierarchical classification of moving vehicles based on empirical mode decomposition of micro-Doppler signatures," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 5, pp. 3001–3013, 2012.
- [26] Z. Khodkar, seyed M. Alavi, and N. Parhizgar, "Feature Extraction from Helicopter Using Time Domain Back Scattered Pulses," *Passiv. Def. Sci. Tech.*, vol. 3, pp. 219–229, 2013.
- [27] G. Chen, H. Yu, and X. Yang, "Micro-Doppler analysis and parameter estimation of the rotating linear rigid target," in *2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, 2012, vol. 1, pp. 94–97.
- [28] M. K. Błkaczyk *et al.*, "Micro-Doppler signatures of helicopters in multistatic passive radars," *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 9, no. 9, pp. 1276–1283, 2015, doi: 10.1049/iet-rsn.2015.0125.
- [29] C. Clemente and J. J. Soraghan, "Gnss-based passive bistatic radar for micro-doppler analysis of helicopter rotor blades," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 50, no. 1, pp. 491–500, 2014, doi: 10.1109/TAES.2013.120018.
- [30] D. P. Fairchild and R. M. Narayanan, "Multistatic micro-Doppler radar for determining target orientation and activity classification," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 52, no. 1, pp. 512–521, 2016.
- [31] J. Xu, X.-Z. Dai, X.-G. Xia, L.-B. Wang, J. Yu, and Y.-N. Peng, "Optimizations of multisite radar system with MIMO radars for target detection," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 47, no. 4, pp. 2329–2343, 2011.
- [32] J. L. Garry and G. E. Smith, "Experimental Observations of Micro-Doppler Signatures with Passive Radar," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 55, no. 2, pp. 1045–1052, 2019, doi: 10.1109/TAES.2019.2895584.
- [33] P. Setlur, F. Ahmad, and M. Amin, "Helicopter radar return analysis: Estimation and blade number selection," *Signal Processing*, vol. 91, no. 6, pp. 1409–1424, 2011.
- [34] R. Zhang, G. Li, C. Clemente, and P. K. Varshney, "Helicopter classification via period estimation and time-frequency masks," in *2015 IEEE 6th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing (CAMSAP)*, 2015, pp. 61–64.

- [54] Z. Khodkar and S. M. Alavi, "Target Classification Enhancement in VHF Radar Using Support Vector Machine," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Electr. Eng.*, vol. 40, no. 1, pp. 51–62, 2016, doi: 10.1007/s40998-016-0004-2.
- [55] H. R. Hashempour, "Fast Parametric ISAR Autofocus Algorithm Based On Entropy and Eigenvalue Decomposition," *Journal of Radar*, vol. 7, no. 1, pp. 15–23, 2019.
- [56] G. Li, R. Zhang, W. Rao, and X. Wang, "Separation of multiple micro-Doppler components via parametric sparse recovery," in *2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS*, 2013, pp. 2978–2981.
- [57] G. Li and P. K. Varshney, "Micro-Doppler parameter estimation via parametric sparse representation and pruned orthogonal matching pursuit," *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, vol. 7, no. 12, pp. 4937–4948, 2014.
- [58] D. Gaglione, C. Clemente, F. Coutts, G. Li, and J. J. Soraghan, "Model-based sparse recovery method for automatic classification of helicopters," in *2015 IEEE Radar Conference (RadarCon)*, 2015, pp. 1161–1165.
- [50] X. Dong, S. Chen, G. Xing, Z. Peng, W. Zhang, and G. Meng, "Doppler Frequency Estimation by Parameterized Time-Frequency Transform and Phase Compensation Technique," *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 9, pp. 3734–3744, 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2812848.
- [51] S. Chen, X. Dong, G. Xing, Z. Peng, W. Zhang, and G. Meng, "Separation of overlapped non-stationary signals by ridge path regrouping and intrinsic chirp component decomposition," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 18, pp. 5994–6005, 2017.
- [52] E. Sejdić, I. Orović, and S. Stanković, "Compressive sensing meets time-frequency: an overview of recent advances in time-frequency processing of sparse signals," *Digit. Signal Process.*, vol. 77, pp. 22–35, 2018.
- [53] L. Stanković, I. Orović, S. Stanković, and M. Amin, "Compressive sensing based separation of nonstationary and stationary signals overlapping in time-frequency," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 61, no. 18, pp. 4562–4572, 2013.