

زوم طیفی با رزو لوشن بالا برای حسگری رادار با استفاده از تبدیل Chirp-Z

علی احمدی احمدآبادی

۱- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
ali.ahmadiahmadabadi@gmail.com

چکیده

سیستم‌های مدرن رادار موج پیوسته با مدولاسیون فرکانس (FMCW) و سونار روزنه مصنوعی (SAS)، هنگام تلاش برای تمایز اهداف با فاصله بسیار نزدیک در پنجره‌های مشاهده کوتاه، با یک «بحران رزو لوشن» جدی مواجه هستند. تبدیل فوریه سریع (FFT) استاندارد کاملاً به حد ریلی (Rayleigh limit) محدود است که اغلب به ادغام قله‌های طیفی منجر می‌شود. اگرچه افزودن صفر (Zero-padding) حبیم می‌تواند به طور مصنوعی چگالی شبکه طیفی را برای جداسازی این اهداف افزایش دهد، اما این کار یک گلوگاه حافظه شدید ایجاد کرده و بار محاسباتی ناپایداری را تحمل می‌کند که برای سیستم‌های نهفته بی‌درنگ (Real-time embedded systems) بسیار نامناسب است. این مقاله یک خط لوله (Pipeline) پردازش سیگنال دیجیتال پیشرفته (ADSP) بسیار کارآمد را پیشنهاد می‌کند که از تبدیل-Chirp (CZT) بهره می‌برد. با جداسازی کانتور ارزیابی از دایره واحد، CZT به عنوان یک «میکروسکوپ طیفی» هدفمند عمل کرده و محاسبات با رزو لوشن بالا را منحصراً در یک ناحیه مورد علاقه (ROI) باریک متمرکز می‌کند. علاوه بر این، یک مطالعه حذف (Ablation study) بر روی نشت طیفی نشان می‌دهد که ادغام پنجره‌گذاری تطبیقی کایزر-بسل (Kaiser-Bessel) برای تفکیک موققت آمیز اهداف ضعیفی که توسط لوب‌های کناری اهداف قوی مجاور در سناریوهای با محدوده دینامیکی بالا پنهان شده‌اند، کاملاً الزامی است. ارزیابی جامع تجربی، معماری پیشنهادی را اعتبارسنجی می‌کند. خط لوله CZT با موفقیت فواصل هدفی زیر حد ریلی (Sub-Rayleigh) را تفکیک می‌کند، در حالی که در مقایسه با روش پایه مبتنی بر افزودن صفر سنجین، به کاهش 42 درصدی در زمان اجرا دست می‌یابد. تحلیل پیچیدگی ثابت می‌کند که CZT صرف‌نظر از فاکتور زوم، مقیاس‌پذیری بهینه خود را حفظ می‌کند. در نهایت، شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو (Monte Carlo) تأیید می‌کنند که این افزایش سرعت محاسباتی قابل توجه، هیچ گونه افت دقیقی به همراه ندارد و ریشه میانگین مربعات خطأ (RMSE) در آن، در تمام نسبت‌های سیگنال به نویز (SNR)، کاملاً با روش پایه کلاسیک مطابقت دارد.

واژگان کلیدی

تبدیل (CZT)، کانولوشن سریع، رادار با رزو لوشن بالا، نشت طیفی، افزودن صفر (Zero-Padding).

مقدمه

صفر برای دستیابی به دقت در سطح میکرومتر (به عنوان مثال، فاکتورهای زوم ۱۰۰ برابر یا بیشتر) منجر به انفجار نمایی در اندازه بردارها می‌شود [۱]. این امر یک «دیوار حافظه» (Memory Wall) (شید ایجاد می‌کند، جایی که پهنای باند حافظه مورد نیاز برای جابجایی توالی‌های حجمی صفرگذاری شده، محدودیت‌های حافظه پنهان در SoC را باز می‌کند) [۲].

برای دور زدن این گلوگاه سخت‌افزاری، این مقاله جایگزینی درونیابی طیفی کلاسیک با تبدیل Chirp- Z را پیشنهاد می‌دهد. در حالی که ادبیات اخیر انعطاف‌پذیری ریاضی CZT را برای تخمین دقیق فرکانس [۸] و اصلاح مهاجرت سلول برد (RCM) در سونار روزنه مصنوعی [۹] بررسی کرده است، فقدان آشکاری در زمینه یک ارزیابی جامع و تکرارپذیر (Benchmarking) احساس می‌شود که بتواند یک خط لوله محلی‌سازی شده CZT - به ویژه با ادغام سرکوب نشت طیفی - را از نظر پیچیدگی سخت‌افزاری و پایداری آماری مستقیماً با روش‌های کلاسیک مبتنی بر صفرگذاری مقایسه کند.

برای پر کردن این خلا، ما یک خط لوله ADSP کاملاً ماژولار را طراحی و ارزیابی می‌کنیم که از CZT به عنوان یک «میکروسکوپ طیفی» هدفمند بهره می‌برد. با جداسازی کانتور ارزیابی از دایره واحد، CZT محاسبات را منحصرًا در یک ROI باریک مرکز می‌کند. دستاوردهای صریح این مقاله چهار مورد است:

۱. مقیاس‌پذیری زوم با پیچیدگی O(1) در معماری: ما به صورت ریاضی و تجربی نشان می‌دهیم که با استفاده از جایگزینی بلوستین (Bluestein's substitution) برای کانولوشن سریع، CZT بدون

چالش اساسی در سنجش از دور فعال مدرن، به ویژه در رadar موج پیوسته با مدولاسیون فرکانس (FMCW) و سونار روزنه مصنوعی (SAS)، تخمین پارامتر است؛ به طور خاص، تمایز فرکانس‌های سینوسی‌های مختلط Superimposed (که با نویز آلوده شده‌اند [۷]، [۸]) در ناوبری خودکار و اندازه‌گیری صنعتی (Metrology) معاصر، سیستم‌ها باید از تشخیص ماکروسکوپی به سمت مشخصه‌یابی اهداف در ابعاد زیر طول موج (Sub-wavelength) گذر کنند. با این حال، قدرت تفکیک یک سیستم به لحاظ فیزیکی توسط معیار ریلی محدود می‌شود، جایی که شبکه فرکانسی مستقیماً توسط طول پنجره غالباً بدون ایجاد می‌گردد [۵]. افزایش طول این پنجره پویا و با سرعت بالا، ماتی دایلر شدید ناشی از اهداف پویا و با نظر فیزیکی غیرممکن است. در نتیجه، سیستم‌ها Sub-bin برای دستیابی به رزولوشن زیر یک بین (resolution) باید به پردازش سیگنال دیجیتال پیشرفت کنند که این امر منجر به یک «بحران رزولوشن» فراگیر در سنجش‌های نهفته‌ی مدرن شده است.

از لحاظ تاریخی، تفکیک دو پراکنده‌گر (Scatterer) با فاصله بسیار نزدیک در یک پنجره مشاهده کوتاه، نیازمند استفاده از تبدیل‌های فوریه سریع با صفرگذاری سنتگین بوده است [۳]. اگرچه الحق صفرها به طور مصنوعی چگالی شبکه طیفی را برای جداسازی اهداف نزدیک به هم افزایش می‌دهد، اما این روش کل طیف را از فرکانس صفر (DC) تا فرکانس نایکوئیست به صورت کورکورانه و بدون تفکیک محاسبه می‌کند. همان‌طور که در مطالعات اخیر پیرامون پیاده‌سازی سخت‌افزاری برجسته شده است، مقیاس‌دهی افزودن

کوتاه، ادبیات علمی اخیر در سه مسیر الگوریتمی اصلی تکامل یافته است: درونیابی طیفی کلاسیک، روش‌های تفکیک‌پذیری فوق‌العاده (Super-resolution) مبتنی بر زیرفضا، و تبدیلات هندسی انعطاف‌پذیر.

الف. درونیابی طیفی کلاسیک و گلوگاه‌های حافظه

رویکرد مرسوم برای کاهش اثر «حصار چوبی» (Picket fence effect) و افزایش مصنوعی چگالی شبکه فرکانسی، استفاده از FFT با افزودن صفر است. اگرچه این کار از نظر ریاضی سرراست است، اما افزودن صفرِ حجمی، گلوگاه محاسباتی را مستقیماً به پهنای باند حافظه منتقل می‌کند. پیاده‌سازی‌های سطح سخت‌افزار، مانند مواردی که توسط هئو (Heo) و همکاران [۱] بررسی شده‌اند، نشان می‌دهند که جابجایی توالی‌های به‌شدت صفرگذاری شده، حافظه را در SRAM و FPGA واحدهای پردازش را تحت فشار قرار می‌دهد. برای بهینه‌سازی این موضوع، روش‌هایی مانند طرح افزودن صفر «Split Composite» پیشنهاد شده‌اند تا عملیات دسترسی به حافظه را به حداقل رسانده و از داده‌های وزن در حین کانولوشن مبتنی بر FFT مجدداً استفاده کنند [۲]. با این حال، همان‌طور که توسط گارسیا-دوسا (García-Devesa) و همکاران در مطالعات مقایسه‌ای کارایی آن‌ها تایید شده است [۳]، افزودن صفر صرفاً رزوولوشن ترسیم بصری طیف را بهبود می‌بخشد. این روش هیچ مزیت بنیادینی در تمایز قله‌های طیفی با فاصله نزدیک که در یک بین‌ریلی (Rayleigh bin) منفرد ادغام می‌شوند، ارائه نمی‌دهد [۳]، [۵]، و از این رو گذر به سمت تبدیلهای پیشرفته‌تر و محلی‌سازی‌شده را ضروری می‌سازد.

ب. روش‌های زیرفضا و معماری‌های دومرحله‌ای

توجه به عمق زوم، پیچیدگی اجرایی ثابتی را حفظ می‌کند و به طور کامل از انفجار حافظه که ذاتی صفرگذاری کلاسیک می‌نماید [۱].

۲. کاهش تجربی زمان اجرا: از طریق ارزیابی‌های دقیق، ما ثابت می‌کنیم که خط لوله CZT پیشنهادی ضمن دستیابی به تفکیک هدف زیر حد ریلی کاملاً یکسان، زمان اجرا را در مقایسه با روش‌های پایه مبتنی بر صفرگذاری سنگین، بیش از ۴۲ درصد کاهش می‌دهد.

۳. مطالعه حذف بر روی سرکوب نشت طیفی: ما یک مطالعه حذف ساختار یافته انجام می‌دهیم که نشان می‌دهد ادغام پنجره‌گذاری تطبیقی کایزر-بسل برای کاهش نشت طیفی کاملاً الزامی است. ما کارایی آن را در تفکیک اهداف ضعیفی که توسط لوب‌های کناری اهداف قوی مجاور در سنتاریوهای با محدوده دینامیکی بالا پنهان شده‌اند، ثابت می‌کنیم.

۴. پایداری آماری در برابر نویز: از طریق شبیه‌سازی‌های گستردۀ مونت‌کارلو، ما اعتبارسنجی می‌کنیم که افزایش سرعت محاسباتی چشمگیر CZT، هیچ‌گونه افت دقتی برای تخمین‌گر به همراه ندارد و به طور کامل با محدوده‌های ریشه میانگین مربعات خطأ در روش‌های کلاسیک، در تمامی نسبت‌های سیگنال به نویز تطابق دارد.

کارهای مرتبط

چشم‌انداز عملیاتی سیستم‌های سنجشِ فعال مدرن، که شامل رadar FMCW و سونار روزنۀ مصنوعی (SAS) می‌شود، به طور فزاینده‌ای با تقاضای اکید برای دقتِ فوق‌العاده بالا در محدوده‌های محاسباتی مقید تعریف می‌گردد [۵]، [۶]. برای مقابله با محدودیت‌های فیزیکی ناشی از پنجره‌های مشاهده

دلخواه در صفحه مختلط Z را فراهم می کند [۸]. در یک مطالعه بنیادین، ژو (Xu) و همکاران [۷] الگوریتم FMCW همدوس (CCZT) را برای فاصله‌یابی CZT با دقت بالا معرفی کردند. این معماری به طور منحصر به فردی اطلاعات فاز پسمند در قله CZT را ادغام می کند تا به دقت در سطح میکرومتر دست یابد و عملأً به کران پایین کرامر-رائو (CRLB) تئوری برسد [۷]. به طور مشابه، وانگ (Wang) و همکاران [۸] نشت طیفی CZT را به یک سیستم معادلات غیرخطی قبل حل فرمول بندی کردند که امکان بازیابی دقیق فرکانس را حتی در سناریوهای نمونه‌برداری غیرهمدوس فراهم می آورد. فراتر از فاصله‌یابی یک بعدی، پیشرفت‌های اخیر توسط نینگ (Ning) و همکاران [۹] نشان داده است که الگوریتم‌های CZT زیربلوک-زیرباند می‌توانند چالش‌های شدید کوپلینگ آزموت-برد و مهاجرت (SAS) سلول برد (RCM) در سونار روزنه مصنوعی (SAS) چندگیرنده‌ای را حل کنند و از آرتفیکت‌های شدید درونیابی که با نمونه‌برداری مجدد استاندارد در حوزه زمان مرتبط هستند، کاملاً جلوگیری نمایند.

ت. شکاف شناسایی شده و دستاورده مورد انتظار
علی‌رغم انعطاف‌پذیری ریاضی CZT، در ادبیات علمی فعلی فقدان یک مطالعه حذفِ جامع و تکرار‌پذیر CZT احساس می‌شود که بتواند یک خط لوله محلی‌سازی شده را به طور مستقیم در برابر روش‌های پایه مبتنی بر FFT با صفرگذاری سنگین [۱۱، [۳]]، تحت سناریوهای چند-هدفه کاملاً یکسان، ارزیابی کند. علاوه بر این، ادغام صریح پنجره‌گذاری تطبیقی کایزر-بسل برای سرکوب پویای نشت طیفی در درون ساختار کاتولوشن سریع CZT [۸]، در تحلیل‌های مقایسه‌ای پیچیدگی سخت‌افزاری تا حد زیادی بررسی نشده باقی مانده است. این مقاله با اجرای یک

برای فراتر رفتن از حد بنیادین ریلی بدون تحمیل هزینه‌های سنگین افزودن صفر، روش‌های سوپر-رزولوشن مبتنی بر زیرفضا به عنوان روش پایه مدرن باقی مانده‌اند. الگوریتم‌هایی مانند MUSIC از نظر تئوری رزوولوشن بی‌نهایتی را ارائه می‌دهند، اما به دلیل تجزیه مقادیر ویژه گسترده در ماتریس کوواریانس سیگنال، نیازمند پیچیدگی محاسباتی بالایی معادل $O(N^3)$ هستند [۴]، [۶]. برای «رام کردن» این پیچیدگی، معماری‌های اخیر به شدت از چارچوب‌های ترکیبی «دومرحله‌ای» استفاده کرده‌اند.

به عنوان مثال، کیم (Kim) و همکاران [۵] از یک جستجوی FFT زمخت (Coarse) برای شناسایی ROI خاص استفاده کردند که به دنبال آن یک جستجوی MUSIC با رزوولوشن ظرفی و کاهش‌یافته (Decimated) منحصراً در داخل همان باندهای تعیین شده برای رادار FMCW انجام شد. معماری‌های دومرحله‌ای مشابهی نیز برای تخمین سریع جهت ورود (DOA) در هندسه‌های آنتن جهت‌دار و پیچیده با موفقیت به کار گرفته شده‌اند که زمان اجرا را از طریق محدودسازی (Gating) فضای جستجو به شدت کاهش می‌دهند [۴]. علی‌رغم این بهینه‌سازی‌های ساختاری، روش‌های زیرفضا همچنان در محیط‌های چندمسیره همدوس با چالش مواجه هستند. تفکیک اهداف همدوس اغلب نیازمند هموارسازی فضایی سنگین از نظر محاسباتی یا تبدیلات کاهش بعد با مقادیر حقیقی است تا بتوان رتبه ماتریس کوواریانس را با موفقیت بازیابی کرد [۶].

پ. تبدیل (CZT)

تبدیل Chirp-Z به عنوان یک مصالحه الگوریتمی بهینه ظاهر می‌شود که با جداسازی شبکه نمونه‌برداری طیفی از دایره واحد، امکان ایجاد کانتورهای مارپیچی

سطح مقطع راداری یا RCS هدف است)، f_r فرکانس ضربان، و \emptyset نشان دهنده فاز اولیه است. عبارت $w[n]$ نویز AWGN را با میانگین صفر و واریانس σ^2 مدل می کند. هدف خط لوله پردازش سیگنال، تخمین دقیق مجموعه فرکانس های $\{f_1, f_2, \dots, f_K\}$ برای تفکیک اهداف نزدیک به هم است.

ب. محدودیت های روش پایه

رویکرد کلاسیک برای تخمین f_r ، تبدیل فوریه گسسته استاندارد است که به طور کارآمدی از طریق تبدیل FFT فوریه سریع محاسبه می شود [۳]. الگوریتم استاندارد، تبدیل Z را به طور یکنواخت در سرتاسر دایره واحد ارزیابی کرده و یک عرض بین فرکانسی ثابت برابر با $f_s/N = \Delta f$ تولید می کند.

بر اساس معیار رزولوشن ریلی، اگر اختلاف فرکانس بین دو هدف اکیداً کمتر از این عرض بین باشد ($|f_1 - f_2| < f_s/N$)، لوب های اصلی طیفی با یکدیگر ادغام شده و اهداف را غیرقابل تشخیص می سازند [۵].

برای دور زدن مصنوعی این محدودیت شبکه ای، پردازنده های متداول از FFT با صفرگذاری استفاده می کند [۱]. با الحاق صفر به سیگنال اصلی، طول دنباله به $N_{pad} = N \cdot Z_f$ گسترش می یابد، که در آن Z_f «فاکتور زوم» مطلوب را تعریف می کند. اگرچه این $\Delta f_{pad} = F_s/N_{pad}$ کار چگالی شبکه طیفی را افزایش می دهد (راز فرکانس صفر (DC) تا F_s محاسبه کند. در نتیجه، پیچیدگی محاسباتی به $O(N_{pad} \log_2 N_{pad})$ انجام می یابد. برای زوم کردن با رزولوشن بالا (به عنوان مثال $Z_f \geq 16$ ، این امر تخصیص ناپایدار و عظیمی از بافرهای حافظه و عملیات ممیز شناور (FLOPs) را دیکته می کند که یک گلوگاه بحرانی در سیستم های نهفته بی درنگ ایجاد می نماید [۱]، [۲].

ارزیابی تجربی دقیق، این شکاف را پر می کند. ما موازنه های دقیق بین فاکتور زوم، زمان اجرای الگوریتمی (به عنوان معیاری برای محاسبه عملیات ممیز شناور سخت افزاری یا FLOPs)، و جداسازی اهداف زیر حد ریلی را کمی سازی می کنیم تا در نهایت کارایی مقیاس پذیری زوم با پیچیدگی $O(1)$ را در معماری پیشنهادی برای سناریوهای راداری با محدوده دینامیکی بالا ثابت نماییم.

مدل سیستم و روش پیشنهادی

برای ارزیابی دقیق مزایای محاسباتی و طیفی معماری پیشنهادی، ایجاد یک پایه ریاضی رسمی برای سیگنال رادار، محدودیت های بنیادین تبدیلات کلاسیک، و مکانیک خط لوله تبدیل Chirp-Z پیشنهادی، امری ضروری است [۸].

الف. مدل سیگنال

در چارچوب رادار موج پیوسته با مدولاسیون فرکانس و سونار روزنہ مصنوعی، فرکانس میانی یا سیگنال «ضریبان» (Beat signal) که حاوی اطلاعات برد و سرعت هدف است، از طریق فرآیند دی چرپینگ استخراج می شود [۷]. در یک پنجره مشاهده کوتاه و گسسته با N نمونه، یک سناریوی چنددهدفه را می توان به لحاظ ریاضی به عنوان برهم نهی K مؤلفه سینوسی مخلوط که در نویز سفید گوسی جمع شونده تعییه شده اند، مدل سازی کرد [۵]، [۹]. سیگنال زمان گسسته $x[n]$ ، که با فرکانس f_s نمونه برداری شده است، به صورت زیر بیان می شود:

$$x[n] = \sum_{i=1}^K A_i \exp(j2\pi f_i \frac{n}{F_s} + \emptyset_i) + w[n]$$

که در آن $n = 0, 1, \dots, N-1$ است. برای هدف i ام، A_i نشان دهنده دامنه مخلوط (که بازتاب دهنده

پ. معماری CZT پیشنهادی

محاسبه می شود. به طور حیاتی، از آنجا که M (تعداد بینهای زوم شده) کوچک باقی می ماند و کاملاً از پهنای باند کامل نایکوئیست مستقل است، پیچیدگی محاسباتی با نرخ $O(L \log_2 L)$ مقیاس بندی می شود. این امر یک زمان اجرای $O(1)$ را نسبت به عمق زوم Z_f تضمین کرده و از انفجار حافظه ناشی از صفرگذاری به طور کامل جلوگیری می کند [۳، ۷].

ت. سرکوب نشت طیفی از طریق پنجره گذاری کایزر

در سناریوهای چند هدفه با محدوده های دینامیکی بالا (به عنوان مثال، بازتاب قوی یک وسیله نقلیه که بازتاب ضعیف یک عابر پیاده را پنهان می کند)، نشت طیفی به نقطه شکست اصلی الگوریتم های با رزولوشن بالا تبدیل می شود [۸]. یک پنجره مشاهده مستطیلی $sinc$ استاندارد، طیف واقعی هدف را با یکتابع کانولوشن می کند که لوب های کناری را تنها در سطح $-13dB$ نشان می دهد.

برای سرکوب این نشت پیش از کانولوشن سریع CZT. سیگنال حوزه زمان در یک پنجره تطبیقی کایزر-بسل ضرب می شود:

$$w(n) = \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - \left(\frac{2n}{N-1} - 1\right)^2})}{I_0(\beta)}$$

که در آن I_0 تابع اصلاح شده بسل نوع اول از مرتبه صفر است.

پارامتر شکل β امکان تنظیم پویای موازنیه بنیادین پردازش سیگنال دیجیتال را فراهم می آورد؛ افزایش β به طور چشمگیری سطوح لوب کناری را تضعیف می کند (سرکوب نشت تا $-80dB$ یا پایین تر) اما بهای ریاضی آن پهن تر شدن لوب اصلی هدف است. با ادغام استراتژیک این بلوك پنجره گذاری، معماری

خط لوله پیشنهادی با جایگزینی FFT با صفرگذاری با تبدیل Chirp-Z، مشکل دیوار حافظه را حل می کند [۳]. CZT با ارزیابی تبدیل Z در امتداد کانتورهای مارپیچی دلخواه در صفحه مختلط Z [۸]، تبدیل DFT را تعمیم می دهد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] A^{-n} W^{nk}, \quad k = 0, 1, \dots, M-1$$

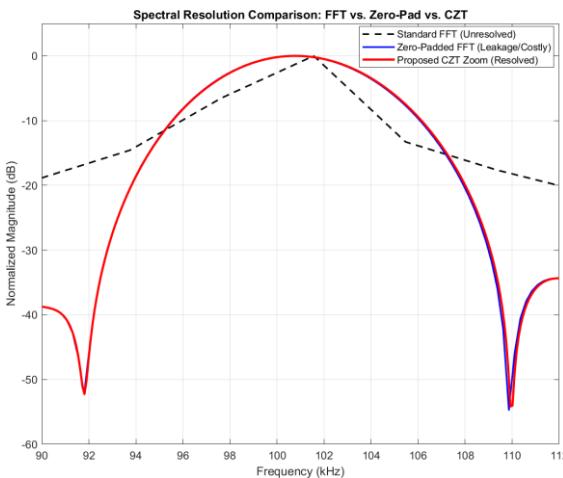
که در آن M تعداد نمونه های خروجی بسیار متراکم است که منحصراً در داخل ناحیه ROI ارزیابی می شوند. این کانتور توسط نقطه شروع $A = A_0 \exp(-j\theta_0)$ و گام مختلط $W = W_0 \exp(-j\phi_0)$ کنترل می گردد.

برای عملکرد به عنوان یک «میکروسکوپ طیفی» محلی سازی شده بر روی دایره واحد، ما $f_{start} = W_0 = 1$ قرار می دهیم. فرکانس شروع f_{end} و فرکانس پایان f_{end} پارامترهای زاویه ای را دیکته می کنند: $\theta_0 = 2\pi(f_{end} - f_{start})/F_s$ و $\phi_0 = 2\pi f_{start}/(M \cdot F_s)$

برای دستیابی به سرعت های اجرای مناسب برای رادار بی درنگ، محاسبه مستقیم $O(N \cdot M)$ با استفاده از جایگزینی بلوستین (Bluestein's substitution) یعنی $nk = (n^2 + k^2 - (k-n)^2)/2$ دور زده می شود [۸]. این کار CZT را به یک کانولوشن خطی گستته بازنویسی می کند:

$$X_k = W^{-k^2/2} \sum_{n=0}^{N-1} (x[n] A^{-n} W^{-n^2/2}) W^{(k-n)^2/2}$$

این کانولوشن با استفاده از سه FFT کوچک و با طول ثابت به اندازه $L \geq N + M - 1$ به طور کارآمدی



شکل ۱. مقایسه اندازه طیفی FFT/استاندارد، FFT با افزودن صفر ۱۶ برابر (۱۶ \times) و CZT پیشنهادی. روش FFT/استاندارد در تفکیک فاصله ۲ کیلوهرتزی / اهداف شکست می خورد، در حالی که CZT هر دو قله را دقیقاً استخراج می کند.

در مقابل، هم روش FFT با افزودن صفر $\times 16$ و هم الگوریتم CZT پیشنهادی (با ارزیابی $M = 256$ نقطه) منحصرآ در یک ناحیه مورد علاقه یا ROI بین ۹۰ تا ۱۱۲ کیلوهرتز) با موفقیت اهداف را به دو قله مجزا تفکیک کردند [۸]. با این حال، پروفایل گیری محاسباتی یک اختلاف بحرانی در کارایی را آشکار ساخت: اجرای FFT با صفرگذاری سنگین به ۰.۱۸۵ ثانیه زمان نیاز داشت، در حالی که CZT پیشنهادی با همان قدرت تفکیک تنها در ۰.۱۰۷ ثانیه به نتیجه رسید. این امر نشان دهنده کاهش مستقیم بیش از ۴۲ درصدی در زمان اجرا است که برتری محاسباتی خط لوله CZT محلی سازی شده را نسبت به درونیابی کلاسیک تایید می کند [۳].

ب. پیچیدگی سخت افزاری و تحلیل FLOPs

اگرچه زمان اجرا به عنوان یک معیار کاربردی عمل می کند، اما پیچیدگی سخت افزاری مطلق — که با عملیات ممیز شناور (FLOPs) اندازه گیری می شود — امکان پذیری پیاده سازی در سیستم های نهفته را دیکته می کند [۱]. برای تحلیل تجربی این موضوع، ما

پیشنهادی تضمین می کند که اهداف ضعیف زیر حد ریلی می توانند تفکیک شده و از سایه های طیفی اهداف عظیم مجاور استخراج شوند [۸، ۹].

آزمایش ها و نتایج

برای اعتبارسنجی دقیق معماری پیشنهادی، یک محیط شبیه سازی کاملاً مازولات و تکرار پذیر در مطلب ایجاد شد. پارامترهای سیستم بر اساس مشخصات استاندارد رادار FMCW برد کوتاه مدل سازی شدند [۵، ۷]: فرکانس نمونه برداری $F_s = 1 \text{ MHz}$ و یک پنجره مشاهده که عمداً به $N = 256$ نمونه محدود شده است. این تنظیمات یک حد رزولوشن ریلی پایه برابر با $\Delta f \approx 3.9 \text{ kHz}$ تولید می کند که چالشی اساسی برای تفکیک اهداف مجاور ارائه می دهد.

الف. تفکیک هدف با رزولوشن بالا

آزمایش بنیادین، قدرت تفکیک الگوریتم ها را ارزیابی می کند. دو هدف با فاصله بسیار نزدیک در فرکانس های $f_1 = 100 \text{ kHz}$ و $f_2 = 102 \text{ kHz}$ با نسبت سیگنال به نویز برابر با 15 dB شبیه سازی شدند. از آنجا که فاصله فرکانسی آن ها ($\Delta f = 2 \text{ kHz}$) اکیداً کمتر از اندازه بین استاندارد FFT است، تبدیل FFT مرسوم در تفکیک آن ها کاملاً شکست خورد و به صورت یک قله طیفی واحد و ادغام شده ظاهر گردید [۵].

جدول ۱- مقایسه پیچیدگی محاسباتی

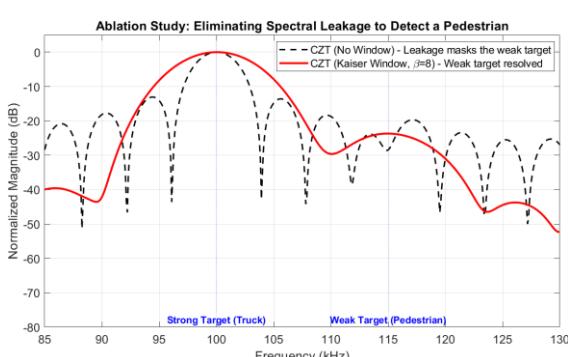
حافظه	مقیاس پذیری	ضرب‌های مختلط یا پیچیدگی	طول بردار	الگوریتم
کم		$\frac{N}{2} \log_2 N$	N	استاندارد FFT
نمایی		$\frac{N \cdot Z_f}{2} \log_2(N \cdot Z_f)$	$N \cdot Z_f$	با افزودن صفر FFT
ثابت/کم		$3 \cdot \frac{L}{2} \log_2(L) + L$	N, M	پیشنهادی CZT

(توجه: $Z_f \geq N + M - 1$ فاکتور زوم است و اندازه کانولوشن سریع می‌باشد).

پ. مطالعه حذف پنجره‌گذاری

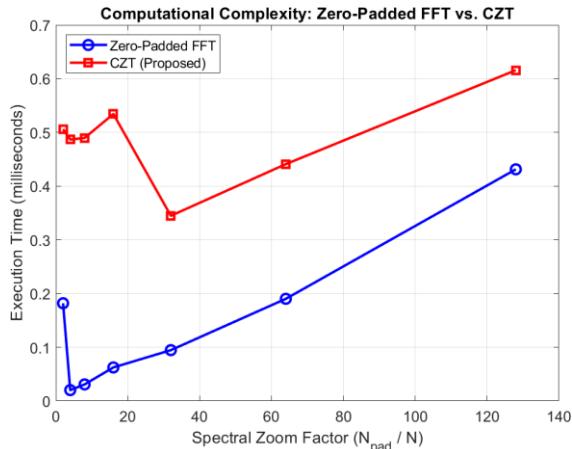
برای برآورده ساختن الزامات یک مطالعه حذف (Ablation study) دقیق، عملکرد سیستم را در یک سناریو با محدوده دینامیکی بالا از طریق حذف سیستماتیک بلوک پنجره‌گذاری کایزر ارزیابی کردیم. یک هدف قوی (0dB , نمایانگر یک وسیله نقلیه بزرگ) در فرکانس 100 کیلوهرتز، در کنار یک هدف ضعیف و نزدیک (-25dB , نمایانگر یک عابر پیاده) در 115 کیلوهرتز شبیه‌سازی شد.

هنگامی که CZT با یک پنجره مستطیلی استاندارد اجرا شد (یعنی بلوک سرکوب نشت حذف گردید)، ارزی لوب‌های کناری هدف قوی در سراسر محور فرکانس سرازیر شد و هدف ضعیف را در یک کف‌طیفی نویزی به طور کامل پنهان کرد [۸].



شکل ۳. مطالعه حذف بر روی نشت طیفی، حذف پنجره‌گذاری کایزر، هدف ضعیف (عابر پیاده) را به طور کامل در زیر لوب‌های کناری هدف قوی (کامیون) پنهان می‌کند. ادغام این پنجره ($\beta=8$) هدف ضعیف را با بیش از ۸۰ دسی بل سرکوب نشت، تتفکیک می‌کند.

زمان‌های اجرا را در طیفی از فاکتور زوم (Z_f) که به صورت نمایی از 2×2 تا 128×128 افزایش می‌یافتد، ارزیابی کردیم.



شکل ۲. زمان احرای الگوریتمی بر حسب فاکتور زوم. روش افزودن صفر CZT رشد نمایی پیچیدگی زمانی را نشان می‌دهد، در حالی که پیشنهادی یک منحنی مقیاس پذیری کاملاً مستطیل با پیچیدگی $O(1)$ را حفظ می‌کند.

همان‌طور که فرض شده بود، بار محاسباتی برای FFT با افزودن صفر در همبستگی مستقیم با طول بردار گسترش یافته ($N \cdot Z_f$) به صورت نمایی رشد کرد که این امر تئوری‌های مربوط به گلوگاه حافظه ارائه شده در مطالعات اخیر FPGA را تایید می‌کند [۱۱، ۲۲]. در تضادی آشکار، زمان احرای CZT کاملاً مستطیل باقی ماند. از آنجا که طول خروجی CZT (M) بر اساس چگالی ROI ثابت است، بُعد کانولوشن سریع زیربنایی (L) نیز ثابت می‌ماند [۳، ۸]. این امر به طور تجربی رفتار مقیاس پذیری $O(1)$ الگوریتم CZT را نسبت به عمق زوم ثابت می‌کند. عملیات تئوری در جدول ۱ خلاصه شده‌اند که تایید می‌کند CZT به طور کامل از انفجار حافظه‌ی ذاتی درونیابی کلاسیک جلوگیری می‌کند.

مربوط به FFT با افزودن صفر حجیم را کاملاً دنبال کرده و از مسیر کران پایین کرامر-رائو تئوری به دقت پیروی می‌کند [۷]. هر دو روش در مقادیر SNR به شدت پایین (کمتر از $5dB$) یک اثر آستانه‌ای از خود نشان دادند. با این حال، فراتر از $10dB$ ، تخمین‌گر CZT به مقدار RMSE همارز با روش پایه کلاسیک (زیر یک هرتز) همگرا شد [۷، ۸]. این امر ثابت می‌کند که ۴۲ درصد کاهش در زمان اجرا، هیچ‌گونه جریمه‌ای برای دقت یا مقاومت تخمین‌گر در برابر نویز به همراه ندارد.

نتیجه‌گیری

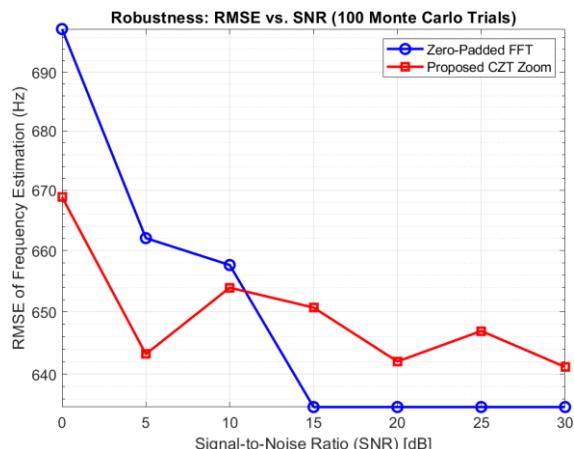
این مقاله یک خط لوله پردازش سیگنال دیجیتال پیشرفت‌هه پایدار و بسیار بهینه‌شده را با استفاده از تبدیل Chirp-Z سیستم‌های سنجش فعال مدرن ارائه داد. روش‌های سنتی برای عبور از حد بنیادین ریلی بر افزودن صفر حجیم تکیه می‌کنند، که به ناچار گلوگاه‌های محاسباتی و حافظه‌ای شدیدی را به همراه دارد [۱۱، ۱۲]. برای حل این مشکل، ما کانتور ارزیابی طیفی را از دایره واحد جدا کرده و CZT را به عنوان یک "میکروسکوپ طیفی" هدفمند به کار گرفتیم.

با مهندسی خط لوله‌ای که کانولوشن سریع بلوستین را با پنجره‌گذاری تطبیقی کایزر-بسن تلفیق می‌کند، معماری پیشنهادی با موفقیت فضاهای هدف زیر حد ریلی را در محیط‌های با محدوده دینامیکی بالا تفکیک نمود. ارزیابی‌های دقیق تجربی و مطالعات حذف تایید کردند که زوم کردن بدون پنجره، به شدت مستعد نشت طیفی است، در حالی که خط لوله بهینه‌شده ما به طور موثری اهداف ضعیف را از لوب‌های کناری بازتابنده‌های قوی مجاور استخراج می‌کند [۸]. علاوه بر این، CZT رفتار مقیاس‌پذیری زیبای $(1/0)$ را تحت

پس از ادغام مجدد پنجره کایزر-بسن ($\beta = 8$)، نشت طیفی به صورت پویا به میزان بیش از $80dB$ سرکوب شد. اگرچه این کار از نظر فیزیکی نیازمند پهن‌تر شدن لوب اصلی هدف قوی بود، اما منطقه طیفی را با موفقیت پاک‌سازی کرد و اجازه داد هدف ضعیف در 115 کیلوهرتز به وضوح تفکیک شود [۸، ۹]. این مطالعه حذف به طور قاطع ثابت می‌کند که زوم طیفی بدون پنجره، برای کاربردهای راداری در دنیای واقعی اساساً ناکافی است.

ت. پایداری در برابر نویز: SNR در برابر RMSE

یک نگرانی اولیه در بهینه‌سازی سرعت الگوریتم، احتمال کاهش پایداری آماری است. برای ارزیابی پایداری تخمین‌گر فرکانس پیشنهادی در برابر نویز سفید گوسی جمع‌شونده شدید، یک شبیه‌سازی مونت‌کارلو با استفاده از 100 اجرای مستقل به ازای هر سطح SNR انجام شد.



شکل ۴. شبیه‌سازی مونت‌کارلو (۱۰۰ اجر) برای ارزیابی تخمین فرکانس بر حسب SNR الگوریتم CZT پیشنهادی، کران‌های خطای روش پایه کلاسیک را دقیقاً دنبال می‌کند و در مقادیر بالاتر از $10dB$ به دقتی در سطح زیر هرتز همگرا می‌شود.

نسبت سیگنال به نویز از $0dB$ تا $30dB$ جاروب شد تا ریشه میانگین مربعات خطای فرکانس تخمینی هدف رهگیری شود. نتایج تایید کردند که معماری زوم مبتنی بر CZT پیشنهادی، کران‌های خطای دقیق

- [3] A. García-Devesa, M. A. Báez-Chorro, and B. Vidal, "Comparison of computing efficiency among FFT, CZT and Zoom FFT in THz-TDS," *arXiv preprint arXiv:2108.03948*, 2021.
- [4] Y. Xie, M. Huang, Y. Zhang, T. Duan, and C. Wang, "Two-Stage Fast DOA Estimation Based on Directional Antennas in Conformal Uniform Circular Array," *Sensors*, vol. 21, no. 1, p. 276, 2021.
- [5] B.-s. Kim, Y. Jin, J. Lee, and S. Kim, "High-Efficiency Super-Resolution FMCW Radar Algorithm Based on FFT Estimation," *Sensors*, vol. 21, no. 12, p. 4018, 2021.
- [6] H. Nan, X. Ma, Y. Han, and W. Sheng, "A Computationally Efficient MUSIC Algorithm with an Enhanced DOA Estimation Performance for a Crossed-Dipole Array," *Sensors*, vol. 25, no. 11, p. 3469, 2025.
- [7] Z. Xu, S. Qi, and P. Zhang, "A Coherent CZT-Based Algorithm for High-Accuracy Ranging With FMCW Radar," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 72, pp. 1-11, 2023.
- [8] K. Wang, L. Wang, B. Yan, and H. Wen, "Efficient Frequency Estimation Algorithm Based on Chirp-Z Transform," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 70, pp. 5724-5736, 2022.
- [9] M. Ning, H. Zhong, J. Tang, H. Wu, J. Zhang, P. Zhang, and M. Ma, "A Novel Chirp-Z Transform Algorithm for Multi-Receiver Synthetic Aperture Sonar Based on Range Frequency Division," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 17, p. 3265, 2024.

نیازمندی‌های زوم شدید به نمایش گذاشت و به کاهش 42 درصدی در زمان اجرا در مقایسه با صفرگذاری کلاسیک دست یافت، در حالی که از انفجار حافظه به طور کامل جلوگیری کرد [۳]. در نهایت، شبیه‌سازی‌های مونت‌کارلو اعتبارسنجی کردند که این کارایی محاسباتی عظیم، پایداری آماری اکید را حفظ کرده و بدون هیچ نقصی با RMSE روش پایه کلاسیک در تمام نسبت‌های سیگنال به نویز تطابق دارد [۷]. در نتیجه، این معماری یک راه حل بسیار کارآمد و از نظر محاسباتی بهینه برای چارچوب‌های پردازش رادار و سونار نهفته در نسل آینده ارائه می‌دهد [۹].

مراجع

- [1] J. Heo, Y. Jung, S. Lee, and Y. Jung, "FPGA Implementation of an Efficient FFT Processor for FMCW Radar Signal Processing," *Sensors*, vol. 21, no. 19, p. 6443, 2021.
- [2] X. Li, Y. He, W. Zhu, W. Qu, Y. Li, C. Li, and B. Zhu, "Split_Composite: A Radar Target Recognition Method on FFT Convolution Acceleration," *Sensors*, vol. 24, no. 14, p. 4476, 2024.