

اثر وزندهی کدهای چندگانه ابرمان در تکنیک فشرده‌سازی پالس‌های راداری

سعید عالی قلعه^{۱*}، بیژن زاگری^۲، علی قربانی^۳

۱. کارشناسی ارشد رشته مخابرات، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳. دانشجوی کارشناسی الکترونیک، دانشگاه علم و صنعت، واحد بهشهر

saeed.alighale@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰

چکیده

در رادارهای پالسی، استفاده از تکنیک فشرده‌سازی پالس، موجب افزایش قدرت تفکیک‌پذیری اهداف می‌شود. این تکنیک با استفاده از مدولاسیون فاز یا فرکانس سیگنال ارسالی در فرستنده و استفاده از فیلتر منطبق‌شده با سیگنال ارسالی در گیرنده، پیاده‌سازی می‌شود. کد ابرمان یکی از کدهای استفاده‌شده در تکنیک فشرده‌سازی پالس با استفاده از مدولاسیون فاز است. این کد پس از فشرده‌سازی، گلبرگ‌های کناری با سطح بالا دارد که بیانگر نامناسب بودن این کد برای کاربردهای راداری است. این مقاله به بررسی و مقایسه تأثیر توابع وزندهی پنجره‌ای مانند همینگ، هنینگ و ناتالوین بر روی کد ابرمان می‌پردازد و نشان می‌دهد که استفاده از توابع وزندهی پنجره‌ای موجب کاهش چشمگیر گلبرگ‌های کناری و هشدار اشتباه و افزایش قابلیت تشخیص هدف در این کد شده است؛ هرچند که به مقدار ناچیزی قدرت تفکیک‌پذیری را کاهش می‌دهد.

کلیدواژه‌گان: فشرده‌سازی پالس، فازهای چندگانه، گلبرگ‌های کناری، کد ابرمان، توابع وزندهی

پنجره‌ای، همینگ، هنینگ، ناتالوین، قدرت تفکیک‌پذیری، توان قله، پالس پهن.

۱. مقدمه

در سیستم‌های راداری، یک پالس بسیار قوی ارسال و به کمک دریافت و پردازش انعکاس‌های آن، اهداف روی صفحه نمایش رادار دیده می‌شود. برای دقت فاصله، تعیین اندازه و شکل یک هدف، رادار باید قدرت تفکیک‌پذیری^۱ بالا داشته باشد. قدرت تفکیک‌پذیری به عرض پالس بستگی دارد؛ بنابراین برای داشتن این ویژگی، نیاز به استفاده از پالس باریک است. از طرفی حداکثر برد رادار به انرژی پالس وابسته است و آن نیز به توان قله و پهنای پالس بستگی دارد؛ بنابراین با کاهش پهنای پالس برای دستیابی به قدرت تفکیک‌پذیری بالا، انرژی پالس و در پی آن برد رادار کاهش می‌یابد. این مشکل به راحتی با افزایش توان قله حل می‌شود. افزایش توان قله با مشکلات و محدودیت‌هایی همراه است: نیاز به پهنای باند بالا به دلیل کم شدن عرض پالس، افزایش سطح نویز به دلیل افزایش پهنای باند (به دلیل افزایش پهنای باند فیلتر ورودی)، نیاز به منبع ولتاژ با توانی در حدود کیلووات، امکان ایجاد شکست الکتریکی در خطوط انتقال به علت توان قله بالا، داشتن مشکلات خنک‌کنندگی، خطر برق‌گرفتگی و پرتوافکنی در نزدیکی تجهیزات، اندازه، وزن و قیمت بالا.

در دهه‌های اخیر، فرستنده‌های نیمه‌هادی جایگزین فرستنده‌های لامپی می‌شوند. این کار، محاسنی دارد از جمله: لامپ‌ها (مانند Magnetron, Klystron, TWT)، مخصوصاً در توان‌های بالا مدولاتورهای بسیار حجیم و پیچیده دارند و این به معنی پایین بودن قابلیت اطمینان سامانه است. حال اینکه نیمه‌هادی‌ها با ولتاژ و جریان‌های بسیار پایین‌تر کار می‌کنند و بنابراین تجهیزات جانبی ساده‌تر و قابلیت اطمینان بالاتری دارند. همچنین اکثر

سیستم‌های راداری جدید از آنتن‌های آرایه فازی استفاده می‌کنند که برای افزایش کارایی آن‌ها، نیاز به استفاده از نیمه‌هادی‌هاست؛ اما با توجه به عدم تحمل ترانزیستور در توان قله بالا امکان ارسال توان زیاد وجود ندارد و لذا پالس‌های ارسالی با پهنای زیاد فرستاده می‌شود.

همه این مزیت‌ها، محدودیت‌ها و مشکلات، ما را به سمت استفاده از پالس‌های پهن سوق می‌دهد؛ اما در این صورت قدرت تفکیک اهداف، به شدت کاهش می‌یابد. این مشکل با استفاده از تکنیک فشرده‌سازی پالس^۲ مرتفع می‌شود و قدرت تفکیک‌پذیری بالا، حاصل خواهد شد. در این روش با استفاده از مدولاتورهای فاز یا فرکانس در مدت‌زمان پهنای پالس ارسالی، پهنای باند افزایش می‌یابد. با استفاده از فشرده‌سازی پالس در گیرنده توسط فیلتر منطبق^۳، که با الگوی پالس ارسالی منطبق است و سیگنال به نویز را در خروجی خود حداکثر می‌سازد، به قدرت تفکیک‌پذیری بالا دست می‌یابیم؛ بدین ترتیب پالس ارسالی پهن، فشرده شده و یک قله اصلی^۴ به همراه تعدادی گلبرگ کناری^۵ در خروجی فیلتر منطبق به دست می‌آید [۱]. نسبت پهنای پالس ارسالی به پهنای پالس فشرده‌شده به عنوان نسبت فشرده‌سازی نامیده شده و برابر BT است که در آن، B برابر پهنای باند و T برابر پهنای پالس ارسالی است.

با استفاده از تکنیک فشرده‌سازی پالس می‌توان با ارسال پالس پهن با توان قله کم به برد و دقت برد مناسبی دست یافت. البته این مزیت در ازای پیچیدگی بیشتر در گیرنده و فرستنده است. اگر طول سیگنال فشرده‌نشده برابر T باشد، گلبرگ‌های کناری در پالس فشرده‌شده به

2. Pulse compression.
3. Matched Filter.
4. Main Lobe.
5. Side Lobe.

1. Resolution.

فقط در گیرنده، به کار گرفته می شود. در این حالت سیگنال باند میانی، قبل از ورود به فیلتر منطبق، در یک پنجره خاص در حوزه زمان ضرب می شود. پنجره های معروفی از قبیل همینگ^۷، هنینگ^۸ و ناتالوین^۹ در تکنیک تکنیک فشرده سازی پالس کاربرد دارد.

در بخش اول این مقاله به معرفی و لزوم استفاده از تکنیک فشرده سازی پالس اشاره شد. در بخش دوم به اختصار چند روش فشرده سازی پالس با مدولاسیون فاز معرفی می شود. در بخش سوم، معیارهایی برای سنجش و مقایسه کمی میزان کارایی پنجره گذاری های متفاوت بیان می شود. نتایج به دست آمده از شبیه سازی و تأثیر پنجره گذاری های متفاوت بر روی کدهای فرانک و اپرمان در بخش چهارم مورد بررسی قرار می گیرد. بخش پنجم شامل نتیجه گیری این مقاله است.

۲. روش های فشرده سازی پالس با استفاده از مدولاسیون فاز

روش های متفاوتی برای تغییرات (مدولاسیون) فاز و فرکانس در پالس ارسالی (کدکردن پالس ارسالی) و نیز فشرده سازی پالس وجود دارد.

در مدولاسیون فاز، پالس با عرض T به **NErrror!** **Bookmark not defined.** زیرپالس^{۱۰} با عرض τ تقسیم می شود که هر زیر پالس با فاز خاصی فرستاده می شود. برای مدولاسیون فاز نیز روش های گوناگونی مطرح شد که می توان آن ها را در سه گروه قرار داد.

اندازه $2T$ گسترده می شود. ماهیت این گلبه های کناری، توسط روش کدکردن پالس ارسالی و فشرده سازی پالس دریافتی تعیین می شود. یکی از مهم ترین فاکتورها در تکنیک فشرده سازی پالس، کم کردن سطح گلبه های کناری است که باعث ایجاد خطا در تشخیص هدف واقعی یا اهداف کوچک قرار گرفته درون گلبه های کناری می شود [۱]، [۲]. علاوه بر ماهیت کدها، اعمال روش های پردازش سیگنال نیز می تواند در کاهش سطح گلبه های کناری نقش داشته باشد.

تکنیک هایی که به منظور کاهش سطح گلبه های کناری در قسمت گیرنده بر روی پالس دریافتی اعمال می شود، تکنیک کاهش سطح گلبه های کناری نامیده می شود. در سال های اخیر، تحقیقات زیادی در این زمینه، انجام شده است و پیشرفت های چشم گیری حاصل شده است که مهم ترین علت آن، استفاده از سیستم ها و پردازشگرهای دیجیتال است. تکنیک های رایج به منظور کاهش سطح گلبه های کناری که امروزه در رادارهای با فشرده سازی پالس استفاده می شوند عبارت اند از: وزن دهی با استفاده از توابع پنجره ای (وزن دهی دامنه^۱ و وزن دهی در حوزه فرکانس) [۳]، فیلتر وو^۲ [۴] و فیلترهای بهبود یافته وو^۳ [۵].

همان طوری که گفته شد، یکی از این روش ها وزن دهی دامنه با استفاده از توابع پنجره ای^۴ است. در این روش، دو دسته تحلیل وجود دارد؛ دسته اول وزن دهی منطبق^۵ که در فرستنده و گیرنده وزن دهی دامنه اعمال می شود و دسته دوم وزن دهی غیر منطبق^۶ است که وزن دهی دامنه

1. Amplitude weighting.
2. Woo filter.
3. Modified Woo filter.
4. Windowing.
5. Matched Weighting.
6. Miss Matched Weighting.

7. Hamming.
8. Hanning.
9. Nuttallwin.
10. Subpulse.

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 2 & \dots & (M-1) \\ 0 & 2 & 4 & \dots & 2(M-1) \\ 0 & 3 & 6 & \dots & 3(M-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & (M-1) & 2(M-1) & \dots & (M-1)^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

درواقع، درایه‌های این ماتریس، فاز هر زیرپالس کد فرانک است. اختصاص فاز به هر زیرپالس از گوش بالایی سمت چپ ماتریس شروع می‌شود و تا انتهای ستون اول پیش می‌رود؛ سپس ستون دوم و الی آخر.

فازهای ماتریس فرانک با رابطه زیر نیز به دست می‌آید [۸]:

$$\varphi_{i,j} = \left(\frac{2\pi}{M}\right)(i-1)(j-1) \quad i, j = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

که $\varphi_{i,j}$ ، فاز سطر i ام و ستون j ام از ماتریس فرانک است.

۲-۲. کدهای P1, P2, P3, P4

این کدها تعمیم یافته روش فرانک است و از نظر سطح گلبرگ‌ها تفاوت چندانی ندارند. تفاوت اصلی آن‌ها پایداری در برابر فرکانس داپلر است [۸].

۲-۳. کد ابرمان

روشی از فازهای چندگانه است که در [۹] مطرح شده است. فاز برای i مین زیرپالس از کد ابرمان به طول N به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varphi_k(i) = \frac{\pi}{N} [K^m i^p + i^n + k i N] \quad i, k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

پارامتر p, m, n اعداد حقیقی است و یک گروه از کد

ابرمان را تعریف می‌کند.

در گروه اول فاز هر زیرپالس می‌تواند 0 یا 180 درجه باشد که به کدهایی با فاز باینری^۱ معروف است، مهم‌ترین ترین آن‌ها کد بارکر^۲ است [۶].

در گروه دوم، فاز هر زیرپالس می‌تواند $0, \pi/2, \pi$ یا $3\pi/2$ و اختلاف فاز هر زیرپالس $\pi/2$ یا $-\pi/2$ است. این کد به کد چهارگانه^۳ [۷] معروف است.

در گروه سوم، فاز هر زیرپالس می‌تواند فازی بین 0 تا 360 درجه باشد که به کدهایی با فاز چندگانه^۴ معروف است. اختصاص فازهای متفاوت به هر زیرپالس و تعداد زیرپالس‌ها، در اندازه گلبرگ‌های کناری تأثیر زیادی دارد. الگوهای مختلفی برای اختصاص فازها به هر زیرپالس مطرح شد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

۲-۱. کد فرانک^۵

کد فرانک [۸]، یک تقریب پله‌ای از مدولاسیون فرکانس خطی است که از M پله فرکانسی و M نمونه برای هر فرکانس تشکیل شده است. به همین دلیل طول کد فرانک برابر $N = M^2$ است. از آنجایی که سیگنال کدشده با کد فرانک، یک سیگنال با مدولاسیون فاز است، بنابراین دامنه ثابتی دارد. به منظور محاسبه و تخصیص فاز به هر زیرپالس در روش فرانک، ماتریس F رابطه (۱) را در نظر بگیرید که یک ماتریس $M \times M$ (یک عدد طبیعی) است. هریک از درایه‌های ماتریس مضربی از $360/M$ است.

1. Binary phase code.
2. Barker code.
3. Quadriphase code.
4. Poly Phase Code.
5. Frank Code.

۳. اندازه گیری کارایی

کدهایی با فاز چندگانه به طول N به صورت زنجیره **Error! Bookmark not defined.** $u = [u(0), u(1), \dots, u(N-1)]$ نشان داده می شود. معیارهایی برای سنجش و مقایسه کمی میزان کارایی روش‌ها [۱۰]، نیاز است که در ادامه به معرفی آن‌ها می پردازیم.

۳-۱. خودهمبستگی غیر پر یودیک^۱

خودهمبستگی غیر پر یودیک $c(l)$ بین یک کد با فاز چندگانه u با شیفته یافته خودش به اندازه l است و به صورت زیر بیان می شود.

$$c(l) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1-l} u(i)u^*(i+l), & 0 \leq l \leq N-1 \\ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1+l} u(i-l)u^*(i), & 1-N \leq l \leq 0 \\ 0, & |l| \geq N \end{cases} \quad (۴)$$

که:

$$u(i) = \exp[j\phi(i)] \quad (۵)$$

i امین زیرپالس از طول N کد فاز چندگانه است و *مزدوج u و فاز هر زیرپالس است.

در کد اپرمان، برای ترکیب ثابتی از پارامترهای p, m, n ، همه کدها دامنه خودهمبستگی مشابهی دارند. اگر $p=1$ ، دامنه خودهمبستگی فقط به n وابسته می شود و از رابطه

$$|C_k(l)| = \left| \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \exp\left\{ \frac{j\pi}{N} [i^n - (i+1)^n] \right\} \right| \quad (۶)$$

به دست می آید. با فرض، با عملیات جست و جوی کامپیوتری، مقدار n برای کمترین سطح گلبرگ کناری به دست می آید (در این مقاله برابر ۲ است). پارامتر m هم

ممکن است برای دسترسی به فاز مورد علاقه یا مشخصات همبستگی متقابل، تغییر داده شود.

۳-۲. معیار^۲ ISL

نسبت توان مجموع کل گلبرگ‌های کناری به توان قله اصلی (ISL) برای یک پالس فشرده شده با کد u به طول N به صورت زیر تعریف می شود [۱۰]:

$$ISL(dB) = 10 \log_{10} \frac{2 \sum_{l=1}^{N-1} |C(l)|^2}{|C(0)|^2} \quad (۷)$$

که $C(l)$ ، دامنه امین نمونه از پالس فشرده شده و $C(0)$ دامنه قله اصلی است.

برای یک پالس فشرده شده، ISL یک مقدار منفی و بر حسب دسی بل است و کاهش آن به معنای کاهش انرژی گلبرگ‌های کناری است که سیگنالی ناخواسته محسوب می شود.

۳-۳. معیار^۳ PSL

نسبت توان ماکزیمم گلبرگ کناری به توان قله اصلی (PSL) برای یک پالس فشرده شده با کد u به طول N به صورت زیر تعریف می شود [۱۰]:

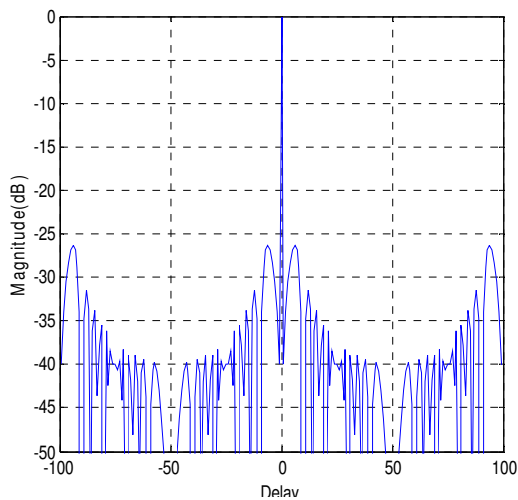
$$PSL(dB) = 20 \log_{10} \frac{\max_{1 \leq l \leq N} |C(l)|}{|C(0)|} \quad (۸)$$

که $C(l)$ ، دامنه امین نمونه از پالس فشرده شده و $C(0)$ دامنه قله اصلی است.

برای یک پالس فشرده شده، PSL یک مقدار منفی و بر حسب دسی بل بوده و کاهش آن که به معنای کاهش سطح گلبرگ‌های کناری است، امری مطلوب در سیستم‌های راداری است. یادآوری می کنیم که کاهش

2. Integrated Sidelobe Level.
3. Peak Sidelobe Level.

1. Aperiodic Autocorrelation.



شکل (۱). پالس فشرده‌شده برای پالس ارسالی گذشته با کد اپرمان به طول $N=100$ و $n=2$ ، $m=1$ و $p=1$

در این مقاله از توابع پنجره‌ای همینگ، هن و ناتالوین استفاده شده است که در جدول (۱) و شکل (۲) نشان داده شده است. پنجرهٔ همینگ پهن‌تر از دو پنجرهٔ دیگر است و در ابتدا و انتها دارای مقدار غیر صفر است. پنجرهٔ ناتالوین نازک‌ترین آن‌هاست و تعداد بیشتری از نمونه‌های ابتدا و انتهای آن دارای مقدار صفر است. پنجرهٔ هن، پنجره‌ای بین همینگ و ناتالوین است. در ادامه، نشان داده می‌شود که ویژگی‌های به‌دست آمده در اثر اعمال این پنجره به کدها، ترکیبی از ویژگی‌های به‌دست آمده در اثر اعمال پنجرهٔ همینگ و ناتالوین است.

سطح گلبرگ‌های کناری رابطهٔ مستقیم با کاهش هشدار اشتباه و افزایش قدرت تشخیص اهداف کوچک قرارگرفته در مجاورت اهداف بزرگ دارد.

۳-۴. پایداری در برابر فرکانس داپلر^۱

فرکانس داپلر هدف باعث می‌شود تا اکوی دریافتی نسبت به الگوی کد ارسالی تغییراتی داشته باشد. این تغییرات شامل تغییر فاز و فرکانس است که موجب عدم تطبیق فیلتر (که با الگوی سیگنال ارسالی منطبق است) با اکوی دریافتی می‌شود [۴]. هرچه فرکانس داپلر بیشتر باشد، این عدم تطبیق افزایش و در نتیجه کارایی سیستم کاهش می‌یابد. در عمل، فرکانس داپلر موجب افزایش دامنهٔ گلبرگ‌های کناری و جابه‌جایی قلهٔ اصلی می‌شود. جابه‌جایی قلهٔ اصلی ابهام در اندازه‌گیری فاصلهٔ هدف را در پی دارد. پایداری در برابر فرکانس داپلر یکی از معیارهای کیفی مهم برای مقایسهٔ روش‌های فشرده‌سازی پالس است.

۴. نتایج شبیه‌سازی

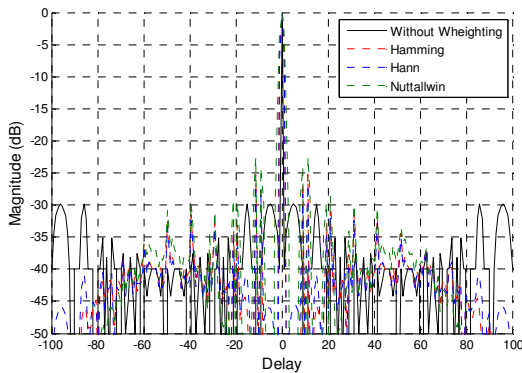
شکل (۱) پالس فشرده‌شده برای یک پالس ارسالی گذشته با کد اپرمان به طول $(p=1, m=1, n=2)$ را نشان می‌دهد. در این شکل -26.78dB است. بزرگی اندازهٔ گلبرگ‌های کناری در این کد، گویای نامناسب بودن آن در کاربردهای راداری است؛ اما استفاده از روش‌های پردازش سیگنال، سطح گلبرگ‌ها را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. یکی از این روش‌ها استفاده از توابع وزندهی پنجره‌ای است.

1. Dopplertolerant.

جدول (۱). معادله توابع وزندهی پنجره‌ای

Window name	Equation
Rectangular	1
Hamming	$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right) \quad 0 \leq n \leq N$
Hanning	$w(n) = 0.5 \left[1 - \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right)\right] \quad 0 \leq n \leq N$
nuttallwin	$w(n) = 0.363 - 0.489 \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right) + 0.136 \cos\left(4\pi \frac{n}{N}\right) - 0.0106 \cos\left(6\pi \frac{n}{N}\right) \quad 0 \leq n \leq N$

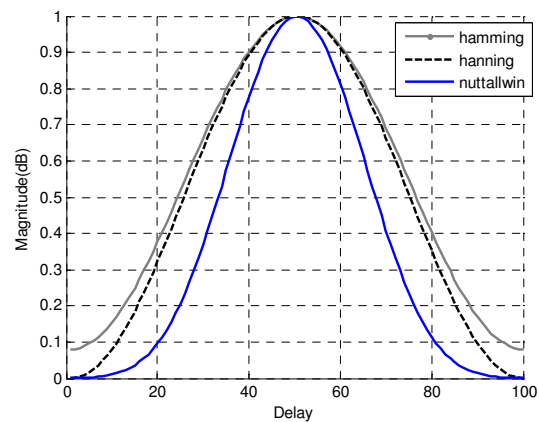
لازم به ذکر است که در این شکل و شکل‌هایی که در ادامه نشان داده می‌شود، در همه حالت‌ها سطح گلبرگ‌ها به اندازه قله اصلی نرمالیزه شده است. بررسی اثر سه پنجره همینگ، هن و ناتالوین نشان می‌دهد که تنها پنجره همینگ اثر مثبتی بر کد فرانک دارد که موجب کاهش ISL به میزان 3dB شده است؛ اما تأثیر منفی بر روی PSL گذاشته و 3.7dB به مقدار آن افزوده است. تأثیر منفی دیگری که در این روش آشکار است، وجود گلبرگ‌های کناری سوزنی‌شکل است که بیانگر افزایش احتمال هشدار اشتباه است. همچنین نزدیکی آن‌ها به قله اصلی مشکل را دوچندان می‌کند؛ زیرا موجب بالارفتن سطح ولتاژ آستانه با هشدار اشتباه ثابت (CFAR^۱) می‌شود [۱].



شکل (۳). کد فرانک فشرده‌شده و تأثیر وزندهی دامنه توسط پنجره‌های همینگ، هن و ناتالوین بر روی آن

پالس فشرده‌شده کد اپرمان با وزندهی توسط پنجره‌ها در شکل (۴) نمایش داده شده است. طبق انتظار، وزندهی دامنه موجب کاهش سطح گلبرگ‌های کناری شده است. با توجه به شکل (۴) تأثیر پنجره‌گذاری بر روی کد اپرمان را از چند منظر می‌توان بررسی کرد:

1. Constant False Alarm Rate.

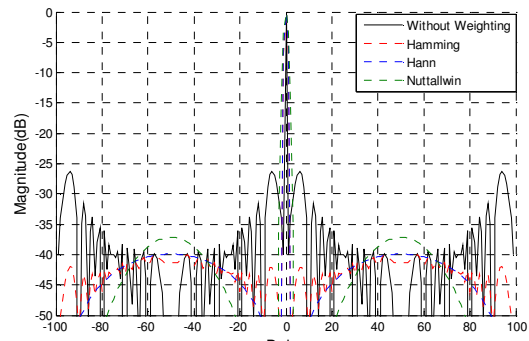


شکل (۴). پنجره‌های همینگ، هنینگ و ناتالوین. ناتالوین نسبت به همینگ و ناتالوین باریک‌تر است.

همان‌طور که بیان شد، عمل وزندهی موجب تغییر ویژگی‌های کد می‌شود. این ویژگی‌ها عبارت‌اند از: ISL:PSL و پایداری در برابر فرکانس داپلر. در ادامه به بررسی و مقایسه تأثیر وزندهی با استفاده از پنجره‌ها در حوزه زمان بر روی کدهای فرانک و اپرمان می‌پردازیم. در شکل (۳) اثر وزندهی بر روی کد فرانک به طول N=100 و در فرکانس داپلر صفر نشان داده شده است.

۴-۱. کاهش ISL

همینگ، هن و ناتالوین به ترتیب موجب کاهش ISL از -15dB تا -20.47 ، -20.98 و -21.06dB می‌شوند. کاهش ISL به معنای افزایش انرژی قله اصلی نسبت به مجموع انرژی گلبرگ‌های کناری و به عبارتی، افزایش قدرت آشکارسازی هدف است؛ بنابراین قدرت آشکارسازی به ترتیب در همینگ، هن و ناتالوین نسبت به حالت بدون پنجره‌گذاری افزایش می‌یابد.

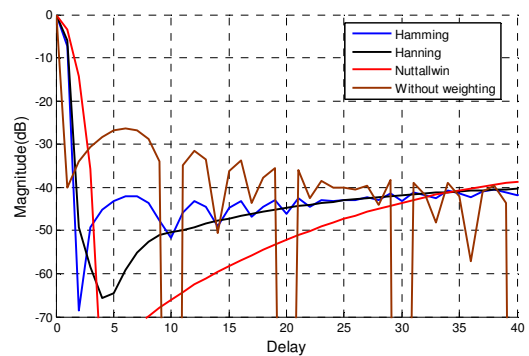


شکل (الف): ۴

۴-۲. افزایش پهنای پیک اصلی (-3dB)

متأسفانه پنجره‌گذاری افزایش پهنای قله اصلی را به دنبال دارد (شکل ۴. ب). این افزایش پهنای قله اصلی به معنای کاهش قدرت تفکیک‌پذیری است. پنجره‌های همینگ، هن و ناتالوین به ترتیب موجب 1.53 ، 1.78 و 3.06 برابر شدن پهنای پیک اصلی می‌شوند؛ برای مثال اگر قدرت تفکیک‌پذیری کد 100 متر باشد، با استفاده از وزندهی همینگ برابر 153 متر می‌شود و این به معنای کاهش قدرت تفکیک‌پذیری است. به این ترتیب که قبل از وزن-دهی دو هدف که فاصله آن‌ها برابر 120 متر است در گیرنده به صورت مجزا (دو پیک در پالس فشرده‌شده) قابل آشکارسازی بود؛ اما پس از وزن-دهی به صورت یک هدف (یک پیک پهن) آشکارسازی می‌شود. در ضمن مقایسه شکل (۲) و شکل (۴. ب) نشان می‌دهد که پهنای پنجره و پهنای قله اصلی رابطه عکس دارد.

میزان اتلاف SNR ملاک مهمی در انتخاب تکنیک کاهش سطح گلبرگ‌های کناری در روش



شکل (ب): ۴

شکل (۴). تأثیر وزندهی دامنه توسط پنجره‌های همینگ، هن و ناتالوین بر روی پهنای قله اصلی کد ابرمان. الف) شکل واقعی ب) بزرگ‌نمایی در محدوده قله اصلی

همینگ، هن و ناتالوین به ترتیب موجب کاهش PSL از -26.78dB تا -40.08 ، -39.91 و -35.76dB می‌شوند. هرچه اندازه قله اصلی نسبت به اندازه گلبرگ‌های کناری بیشتر باشد، احتمال هشدار اشتباه^۱ کمتر شده و قدرت تشخیص اهداف کوچک بیشتر می‌شود.

1. False Alarm.

جدول (۲). نتایج به دست آمده بر اثر اعمال پنجره‌های همینگ، هن و ناتالوین بر روی کد اپرمان ($m=1, p=1, K=1, n=2$)

نام کد	نام پنجره	PSL (dB)	ISL (dB)	پهنای پیک اصلی	تلفات SNR (dB)
فرانک	بدون وزن-دهی	-29.79	-17	1	0
	همینگ	-26.96	-19.76	1.53	5.42
	هن	-25.32	-18.97	1.78	6.1
	ناتالوین	-22.5	-16.3	3.06	8.87
اپرمان	بدون وزن-دهی	-26.78	-15	1	0
	همینگ	-40.08	-20.47	1.53	5.42
	هن	-39.91	-20.98	1.78	6.1
	ناتالوین	-35.76	-21.06	3.06	8.87

۳-۴. بررسی رفتارهای کد فرانکو اپرمان در فرکانس‌های مختلف داپلر

یکی از معیارهای مهم در سنجش میزان کارایی روش‌های فشرده‌سازی پالس، پایداری در برابر فرکانس داپلر است. افزایش فرکانس داپلر موجب جابه‌جایی قله اصلی و افزایش سطح گلبرگ‌های کناری می‌شود. در کدهای با فاز چندگانه، برای غلبه بر مشکل جابه‌جایی قله اصلی تاکنون راه‌حلی پیشنهاد نشده، اما با استفاده از تکنیک‌های پردازش سیگنال می‌توان میزان افزایش سطح گلبرگ‌ها را کاهش داد.

در این قسمت، به منظور بررسی رفتار کدهای فرانک و اپرمان در برابر فرکانس‌های مختلف داپلر و همچنین تأثیر وزن‌دهی بر این رفتار، تغییرات دامنه قله اصلی^۱

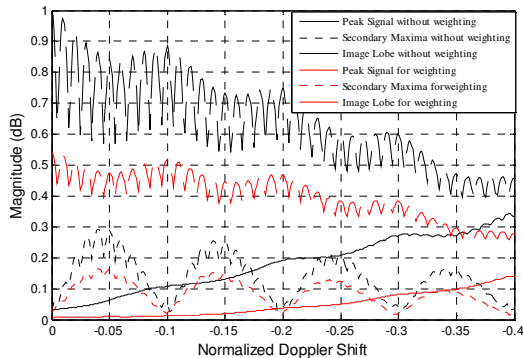
فشرده‌سازی پالس در کاربردهای راداری است. اگر این اتلاف، زیاد باشد، استفاده از آن روش منطقی نیست.

چهار معیار مهم در بررسی میزان کارایی وزن‌دهی با پنجره‌های همینگ، هن و ناتالوین بر روی کدهای فرانک و اپرمان در جدول (۲) آورده شده است. با بررسی این جدول درمی‌یابیم که وزن‌دهی دامنه در حوزه زمان تأثیر منفی بر روی کد فرانک دارد که به صورت افزایش PSL مشخص است. هر چند که پنجره‌های همینگ و هن تأثیر مثبت کوچکی بر روی ISL دارند، در مقابل، تأثیر وزن-دهی بر روی کد اپرمان، مثبت و چشم‌گیر است؛ به طوری که PSL و ISL را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد. ستون آخر جدول مربوط به تلفات SNR است. طبق انتظار وزن‌دهی به علت ایجاد کاهش تطبیق در فیلتر منطبق، موجب افزایش تلفات در SNR شده است.

میزان تلفات برای هر دو کد (بسته به نوع پنجره) به یک اندازه است. این امر در مورد پهنای پیک اصلی هم برای هر دو کد صادق است. در مجموع می‌توان گفت که وزن‌دهی دامنه با استفاده از توابع پنجره‌ای بر روی کدها، تأثیر یکسانی بر روی قدرت تفکیک‌پذیری و تلفات SNR دارد؛ اما میزان تغییرات ISL و PSL به نوع کد ارسالی بستگی دارد.

1. Peak signal.

نشان می‌دهد. کاهش دامنه قله اصلی و افزایش دامنه ماکزیم‌های دوم و شبه‌سیگنال در اثر افزایش فرکانس داپلر در هر دو حالت کاملاً مشخص است. کاهش دامنه قله اصلی، به علت غیرمنطبق شدن فیلتر بوده و به هیچ وجه مطلوب نیست؛ زیرا موجب کاهش SNR می‌شود.

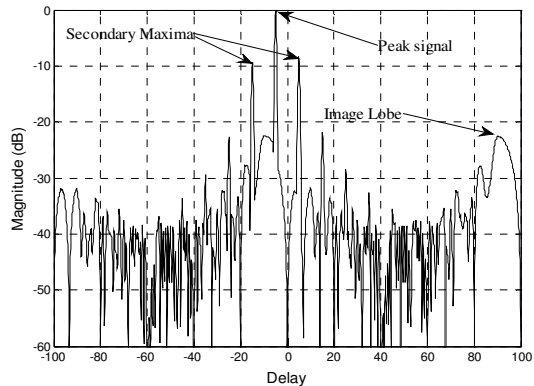


شکل (۶). نقاط رفتار داپلر کد فرانک با طول ۱۰۰

رفتار داپلر کد ابرمان در دو حالت بدون وزندهی و با وزندهی دامنه در شکل (۷) نشان داده شده است. در کد ابرمان، دامنه نوسانات قله اصلی با افزایش فرکانس داپلر با شدت بیشتری نسبت به کد فرانک کاهش می‌یابد. در حالت اول برای هر دو کد، دامنه قله اصلی و ماکزیم‌های دوم، دو برابر حالت دوم است که به معنای تقریباً 6dB کاهش در SNR است. در این دو کد نیز می‌توان با استفاده از روش‌های وزندهی، دامنه شبه‌سیگنال را به منظور کاهش ISL در تمام فرکانس‌های داپلر کاهش داد. با مقایسه رفتار داپلر برای کدهای فرانک و ابرمان چند نکته قابل برداشت است:

- در اثر وزندهی دامنه، درصد نوسانات قله اصلی در هر دو کد کاهش می‌یابد. همچنین موجب کاهش شدید دامنه قله اصلی، ماکزیم‌های دوم و شبه‌سیگنال شده

ماکزیم‌های دوم^۱ (بلندترین گلبرگ‌های کناری نزدیک به قله اصلی) و شبه‌سیگنال^۲ در نظر گرفته می‌شوند [۴]. این پارامترها برای سیگنال فشرده‌شده فرانک با فرکانس داپلر $f_d = 0.05$ در شکل (۵) نشان داده شده است. شبه‌سیگنال نقش مهمی در مجموع انرژی سیگنال (ISL) دارد. ماکزیم‌های دوم در نزدیکی قله اصلی است و در PSL، یا به عبارتی دیگر در میزان احتمال هشدار اشتباه اثرگذار است. همچنین موجب محو شدن قله اصلی ناشی از اهداف کوچکی می‌شود که در نزدیکی هدف اصلی قرار گرفته است.



شکل (۵). نقاط قله اصلی، ماکزیم‌های دوم و شبه‌سیگنال برای سیگنال فشرده‌شده فرانک با طول ۱۰۰ و در فرکانس داپلر $f_d = 0.05$

وزندهی در حوزه زمان، قله اصلی، ماکزیم‌های دوم و شبه‌سیگنال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به منظور بررسی اثر وزندهی بر رفتار داپلر کدها، وزندهی با استفاده از پنجره همینگ در نظر گرفته شد. شکل (۶) رفتار داپلر کد فرانک را در دو حالت بدون وزندهی و با وزندهی دامنه

1. Secondary maxima.
2. Image signal.

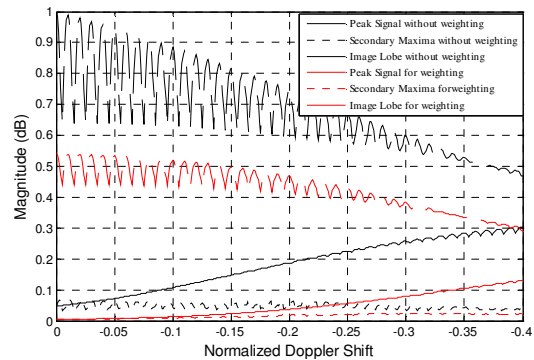
خروجی فیلتر یک قله اصلی به همراه تعدادی گلبرگ کناری با اندازه‌های مختلف است. اگر سطح این گلبرگ‌ها نسبت به قله اصلی قابل مقایسه باشد، تشخیص اهداف با مشکلاتی مواجه می‌شود. تکنیک‌های مختلفی برای کاهش گلبرگ‌های کناری در فشرده‌سازی پالس مطرح شده است که یکی از این روش‌ها توابع وزندهی پنجره‌ای است. این مقاله بر روی توابع وزندهی پنجره‌ای همینگ، هنینگ و ناتالوین، که اغلب در پردازش سیگنال استفاده می‌شود، متمرکز شده است و نتیجه اعمال این توابع را بر روی کدهای فرانک و اپرمان مورد بررسی قرار داد. استفاده از روش وزندهی، موجب کاهش سطح گلبرگ‌های کناری (کاهش PSL) و کاهش ISL در کد اپرمان فشرده‌شده می‌شود؛ اما موجب افزایش پهنای قله اصلی و افزایش تلفات SNR در حوزه زمان می‌شود؛ به عبارتی دیگر، وزندهی پنجره‌ای در کد اپرمان موجب افزایش قابلیت تشخیص هدف و کاهش احتمال هشدار اشتباه می‌شود، هرچند که به مقدار ناچیزی قدرت تفکیک‌پذیری را کاهش می‌دهد، اما بررسی بر روی کد فرانک نشان داد که وزندهی دامنه در حوزه زمان موجب تخریب ویژگی‌های آن (PSL و ISL) می‌شود. بررسی رفتار داپلر کدهای فرانک و اپرمان نشان داد که وزندهی در حوزه زمان برای کد اپرمان، موجب بهبود چشم‌گیری نسبت به کد فرانک می‌شود.

۶. منابع

- [1] M. I. Skolnik, Introduction to radar system, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2001.
- [2] P. E. Peace, Low probability of intercept radar, Artech House, Boston, 2004.
- [3] F. Kretschmer Jr., L.R. Welch, "Sidelobe reduction techniques for polyphase pulse

است. برای کد اپرمان شدت کاهش شبه‌سیگنال و ماکزیمم‌های دوم، بیشتر از قله اصلی است که بیانگر افزایش نسبت قله اصلی به شبه‌سیگنال و نسبت قله اصلی به ماکزیمم‌های دوم است؛ اما در کد فرانک، در اثر وزندهی دامنه شدت کاهش قله اصلی و شبه‌سیگنال زیاد و شدت کاهش ماکزیمم‌های دوم کم است؛ بنابراین عمل وزندهی دامنه بر روی کد فرانک موجب افزایش نسبت قله اصلی به شبه‌سیگنال و کاهش نسبت قله اصلی به ماکزیمم‌های دوم می‌شود.

• عمل وزندهی موجب کاهش قله اصلی و در نتیجه کاهش SNR می‌شود. این امر به علت تبدیل شدن فیلتر منطبق به فیلتر غیرمنطبق است.



شکل (۷). نقاط رفتار داپلر کد اپرمان با طول ۱۰۰

۵. نتیجه و جمع‌بندی

لزوم استفاده از پالس پهن در سیستم‌های راداری جدید، امری ضروری است. استفاده از پالس پهن، کاهش شدید قدرت تفکیک‌پذیری را دربر دارد. تکنیک فشرده‌سازی پالس برای جبران این نقص است. در این تکنیک، پالس ارسالی با استفاده از مدولاسیون فاز یا فرکانس مدوله یا به اصطلاح کد می‌شود و سپس در گیرنده پس از عبور از فیلتر منطبق شده با الگوی پالس ارسالی فشرده می‌شود.

- [8] B. Zakeri, M.R. Zahabi, S. Alighale, "Assessment of the weighting methods used in polyphase pulse compression in zero Doppler shift," *Electrical Engineering (ICEE), 20th Iranian Conference*, pp. 1140 – 1144, 2012.
- [9] I. Oppermann and B. S. Vucetic, "Complex Spreading Sequences with a Wide Range of Correlation Properties," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 45, pp. 365–375, Mar. 1997.
- [10] M. Jamil, H.J. Zepernick, and M. I. Pettersson, "Performance Assessment of Polyphase Pulse Compression Codes", *IEEE Int. Symp. On Spread Spect. Techn. and Appl.*, Bologna, Italy, pp. 161–165, Aug. 2008.
- compression codes," *IEEE International Radar Conference*, pp. 416 - 421, 2000.
- [4] W.K.Lee, H.D.Griffiths, "Development of modified polyphase P codes with optimum sidelobe characteristics." *IEEE Proc Radar, Sonar Navig*, Vol. 151, pp. 210-220, Aug. 2004.
- [5] M. Kumaria, K. Rajarajeswari, K. Krishna, "Low sidelobe pattern using Woo filter concepts," *Elsevier Int. J. Electron. Commun.*, 2005, 499-501.
- [6] A. Akbaripour, M.H. Bastani, "Range Sidelobe Reduction Filter Design for Binary Coded Pulse Compression System," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions* , Vol.48, pp. 348-352, Jan. 2012.
- [7] B.Damtie, M.Lehtinen, M.Orispaa, J.Vierinen, "Mismatched Filtering of Aperiodic Quadriphase Codes," *Information Theory, IEEE Transactions*, Vol. 54, pp. 1742- 1749, April 2008.