مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲۰، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۹

مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران

یادداشت پژوهشی

افزایش نسبت سیگنال به نوفه و بازیابی سیگنال در شرایط SNR<<۱ با استفاده از شبیه‌سازی تقویت کنندهٔ قفل فازی در محیط نرم‌افزار لب‌ویو

محمد بخشیان و حسین عباسی

دانشکدهٔ فیزیک و مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

پست الکترونیکی: m-bakhshian@aut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۹/۰۴/۱۷)

چکیده

آشکارسازی سیگنال‌های ضعیف از جمله مسائل مهم در طیف‌سنجی است. از مهم‌ترین پارامترهای این حوزه نسبت سیگنال به نوفه است که تأثیر قابل توجهی در دقت داده‌های نهایی دارد. در همین راستا یکی از موفق‌ترین راهکارها برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه، استفاده از روش مدولاسیون شدت است. در این روش، ابتدا شدت سیگنال اولیه مدوله می‌شود و پس از ورود به دستگاه طیف‌سنج، به وسیلهٔ تقویت کنندهٔ قفل فازی، دمدوله، تقویت و در نهایت از بین نوفه‌های مختلف سیگنال مورد نظر بازیابی می‌شود. شبیه‌سازی ابزاری بسیار مفید برای این منظور است. شبیه‌سازی، این امکان را به کاربر می‌دهد تا پارامترهای مرتبط را در شرایط اولیه مختلف بررسی کند و آنها را بهینه سازد. مقالهٔ حاضر با استفاده از زبان برنامه‌نویسی گرافیکی لب‌ویو، به طراحی تقویت کنندهٔ قفل فازی اختصاص دارد.

واژه‌های کلیدی: طیف‌سنجی، نسبت سیگنال به نوفه، مدولاسیون شدت، دمدولاسیون، تقویت کنندهٔ قفل فازی، لب‌ویو

۱. مقدمه

در بسیاری از حوزه‌های فناوری مانند طیف‌سنجی، فاصله‌سنج‌های دقیق لیزری و نظایر آن، یکی از صورت مسئله‌های مهم، آشکارسازی توان‌های بسیار کم از مرتبهٔ نانووات و یا حتی فمتووات در حضور نوفه‌های مختلف است [۱]. اگر سیگنال مورد نظر دارای شدت زیاد باشد، آنگاه بر نوفه‌های محیط غالب می‌شود. این به آن معنا است که نسبت سیگنال به نوفه (SNR)[۱] زیاد است (معمولاً SNR>۱۰). به این ترتیب کار بازیابی سیگنال مورد نظر، نسبتاً آسان است و می‌توان از روش‌های معمول و پرکاربرد استفاده کرد. اما اگر سیگنال مورد نظر، شدت ضعیفی داشته باشد و یا نوفه در محیط بسیار زیاد باشد، آنگاه نسبت سیگنال به نوفه کاهش می‌یابد (معمولاً SNR<۵) و به اصطلاح، سیگنال در میان نوفه‌های مختلف گم می‌شود. نوفه از این جهت حائز اهمیت

۱. Signal to Noise Ratio

است که محدودهٔ اساسی عملکرد طبیعی تمام دستگاه‌ها و جریان‌های الکترونیکی را تعیین می‌کند. به طور کلی نوفه‌ها به دو دسته ذاتی (داخلی) و غیر ذاتی (خارجی) دسته‌بندی می‌شوند. نوفه‌های داخلی، خود به چندین زیر شاخه تقسیم می‌شوند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به نوفه‌های سفید، حرارتی، سوسوزن و ضربه‌ای اشاره کرد [۲].

در شرایطی که روش‌های معمول برای بازیابی سیگنال مناسب نباشد، استفاده از روش مدولاسیون شدت ضرورت پیدا می‌کند. در این روش، ابتدا سیگنال مورد نظر توسط مدولاتور (چاپر[۱])، مدوله می‌شود. سپس با استفاده از دستگاه طیف‌سنج، طیف سیگنال به دست می‌آید و در نهایت برای دمدوله کردن، وارد دستگاه تقویت کنندهٔ قفل فازی (LIA)[۲] می‌شود.

به طور معمول، چاپر به عنوان یکی از متداول‌ترین مدولاتورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین ویژگی‌های این مدولاتور می‌توان به سادگی، قیمت مناسب و بسامد پایین آن نسبت به مدولاتورهای دیگر اشاره کرد. دقت به این نکته ضرورت دارد که نرخ نمونه‌برداری آشکارساز، باید حداقل دو برابر بسامد مدولاسیون باشد. از آنجایی که نرخ نمونه‌برداری آشکارسازهایی که در طیف‌سنج‌های معمولی استفاده می‌شود، نسبتاً پایین است از همین رو بسامد مدولاسیون نیز باید متناسب با آن باشد. از همین رو در اکثر مواقع، انتخاب چاپر به عنوان مدولاتور در مواقعی که دستگاه طیف‌سنج مورد استفاده قرار می‌گیرد، ارجحیت دارد.

۲. مبانی نظری

به طور کلی دونوع تقویت کنندهٔ قفل فازی سخت‌افزاری و نرم‌افزاری (مجازی) وجود دارد. در گذشته تقویت کنندهٔ قفل فازی سخت‌افزاری بیشتر رایج بوده است اما امروزه به دلایل مختلف مانند دقت بیشتر، عمر طولانی‌تر، ذخیره آسان‌تر داده‌ها، استفاده از تقویت کنندهٔ قفل فازی نرم‌افزاری نیز مورد توجه قرار گرفته است [۳]. همچنین در اکثر طیف‌سنج‌ها از CCD به عنوان آشکارساز استفاده می‌شود. از آنجایی که خروجی CCDهای تجاری غالباً به صورت دیجیتال است از همین رو استفاده از تقویت کنندهٔ قفل فازی در پروژه‌هایی که با طیف‌سنج انجام می‌گیرد، مشکل‌ساز خواهد شد و در نتیجه تقویت‌کنندهٔ قفل فازی نرم‌افزاری مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].

نحوهٔ کارکرد هر دو نوع تقویت کنندهٔ سخت‌افزاری و نرم‌افزاری یکسان است. تقویت کنندهٔ قفل فازی شامل دوکانال X و Y است. در این مرحله سیگنال مدوله شده برای ورود به کانال X در $\cos(2\pi f_m t)$ و برای ورود به کانال Y در $\sin(2\pi f_m t)$ ضرب می‌شود. سپس خروجی کانال‌های مذکور وارد صافی پایین‌گذر می‌شوند (عمل دمدولاسیون). باید در نظر گرفت که بسامد دمدولاسیون باید با بسامد مدولاسیون یکسان باشد. پس از مرحلهٔ دمدولاسیون، کلیهٔ عملیات برای هر دو کانال به نسبت یکسان است. سیگنال اولیه با V_S نشان داده می‌شود. در مرحلهٔ اول سیگنال مدوله می‌شود. مدوله شدن سیگنال به زبان ریاضی یعنی آن که:

$$V_S \sin(2\pi f_m t), \qquad (۱)$$

که در آن f_m بسامد مدولاسیون و T_m، دورهٔ تناوب مدولاسیون است.

مرحلهٔ بعد مربوط به دمدولاسیون است. در این مرحله سیگنال در $\sin(2\pi f_n t)$ ضرب می‌شود که f_n بسامد دمدولاسیون است. باید دقت داشت که در این قسمت به سیگنال اولیه، نوفه اضافه می‌شود. نوفه را با V_N نمایش می‌دهیم. پس می‌توان نوشت:

$$\int_0^{T_m} V_S(t)\sin(2\pi f_m t)\sin(2\pi f_n)dt + \int_0^{T_m} V_N \sin(2\pi f_n)dt, \qquad (۲)$$

از آنجایی که $V_S(t)$ کند تغییر است، یعنی تغییرات آن با زمان به صورت آهسته است، استفاده از بسط و توابع متعامد مثلثاتی و برابر بودن بسامد مدولاسیون و دمدولاسیون، که شرط اساسی تقویت کنندهٔ قفل فازی است، رابطهٔ بالا به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{T_m}{2} V_S(t) + \varepsilon, \qquad (۳)$$

۱. Chopper

۲. Lock- in Amplifier

در نتیجه سیگنال اولیه تا حد مناسبی حفظ شده است در حالی که نوفه‌های اولیه به میزان بسیار زیادی از بین رفته است. این مسئله همان هدف اصلی تقویت کنندهٔ قفل فازی است.

۳. شبیه‌سازی در محیط لب‌ویو

در کلیهٔ کارهایی که بحث نوفه و سیگنال در میان است سیگنال اولیه باید کاملاً بدون نوفه باشد تا در نهایت بتوانیم سیگنال خروجی بازیابی شده را با سیگنال اولیه مقایسه کنیم. در طبیعت و در عمل امکان یافتن چنین سیگنال بدون نوفه‌ی وجود ندارد؛ از همین روش استفاده از شبیه‌سازی ضرورت پیدا می‌کند تا با تولید یک سیگنال کاملاً بدون نوفه، مراحل بازیابی سیگنال را آغاز کرده و در نهایت بتوانیم سیگنال خروجی را با سیگنال اولیه مقایسه کنیم. به منظور شبیه‌سازی تقویت کنندهٔ قفل فازی از زبان برنامه‌نویسی لب‌ویو استفاده شده است. شکل ۱ نمایی کلی از بلوک دیاگرام و پنجرهٔ کاربری برنامهٔ تقویت کنندهٔ قفل فازی نرم‌افزاری طراحی شده را نشان می‌دهد.

از آنجایی که برای صحت و تأیید شبیه‌سازی انجام شده، نیاز به مرجع اولیه برای مقایسه وجود دارد از همین رو در این شبیه‌سازی سیگنال اولیه به صورت پیش فرض در دست کاربر قرار دارد تا در نهایت، امکان مقایسه میان سیگنال بازیابی شده و سیگنال اولیه وجود داشته باشد. لازم به ذکر است بعد از انجام مقایسه و مطمئن شدن از صحت و درست کار کردن برنامه، می‌توان با اتصال مستقیم سیگنال اولیه و مدولاتور به نرم‌افزار لب ویو کلیه مراحل را به صورت عملی انجام داد.

در برخی از تحقیقات و کارهای علمی، تعیین فاز اولیه سیگنال از مهم‌ترین و اساسی‌ترین اهداف است. از برجسته‌ترین ویژگی‌های شبیه‌سازی حاضر، می‌توان به تعیین فاز خودکار سیگنال اولیه اشاره کرد. در اکثر دستگاه‌های تقویت کنندهٔ قفل فازی پیشرفته این کلید وجود دارد. در این شبیه‌سازی نیز با انجام مراحل مختلف به این مهم دست یافته‌ایم که فاز مجهول سیگنال اولیه با دقت یک درجه تعیین می‌کند.

از دیگر ویژگی‌های این برنامه می‌توان به شبیه‌سازی مدولاتور و صافی شکافی (به منظور حذف نوفه بسامد برق شهری) اشاره کرد. همچنین کلیه کمیت‌های ورودی ازجمله بسامد، دامنهٔ سیگنال ورودی و چاپر، شدت و نوع نوفه، نحوهٔ ذخیرهٔ نمودارهای خروجی، وضوح فاز، ضریب تقویت سیگنال خروجی، نوع و مرتبهٔ صافی انتخابی و دقت فاز توسط کاربر تعیین می‌شود.

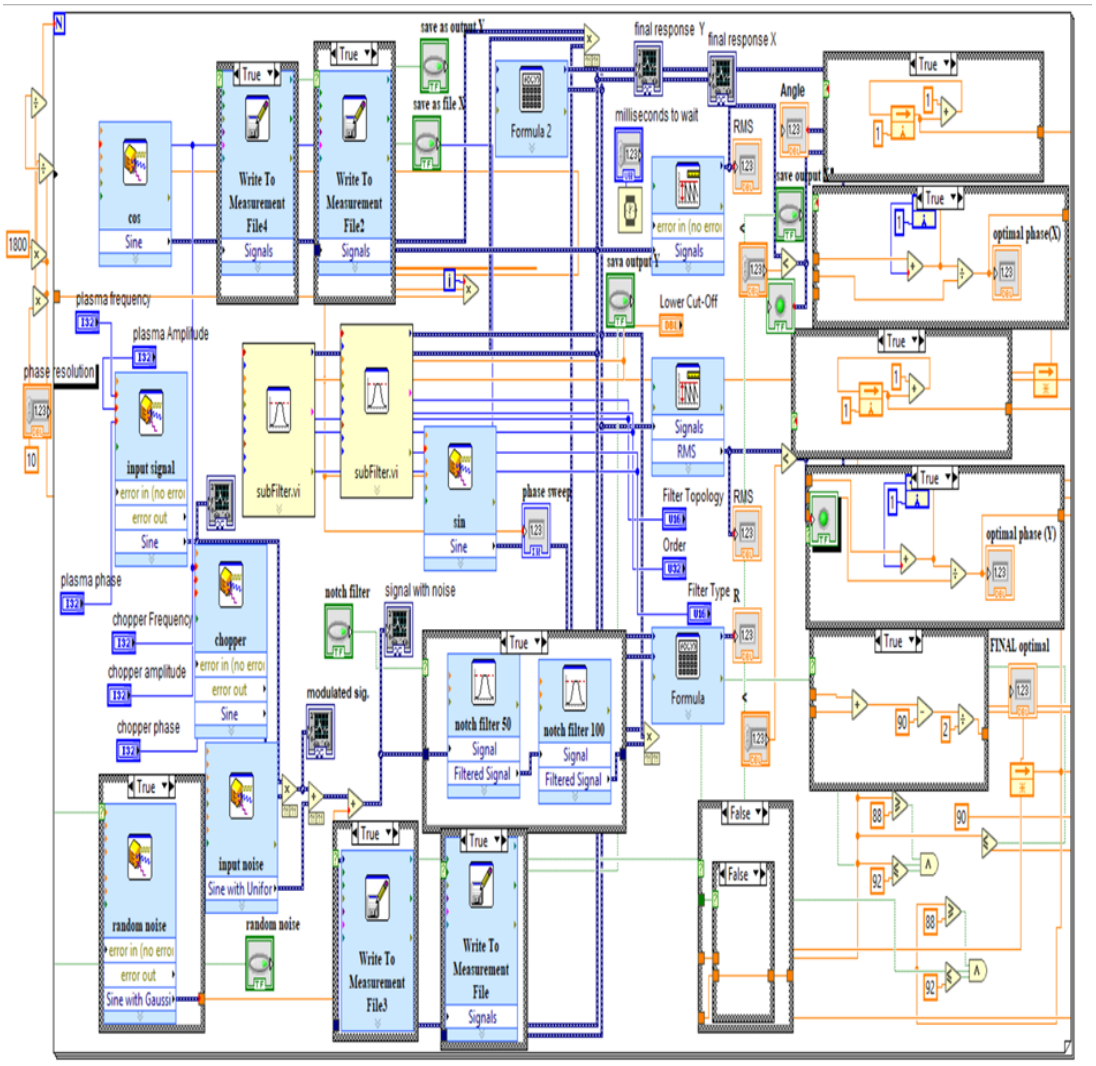
۴. نتایج شبیه‌سازی

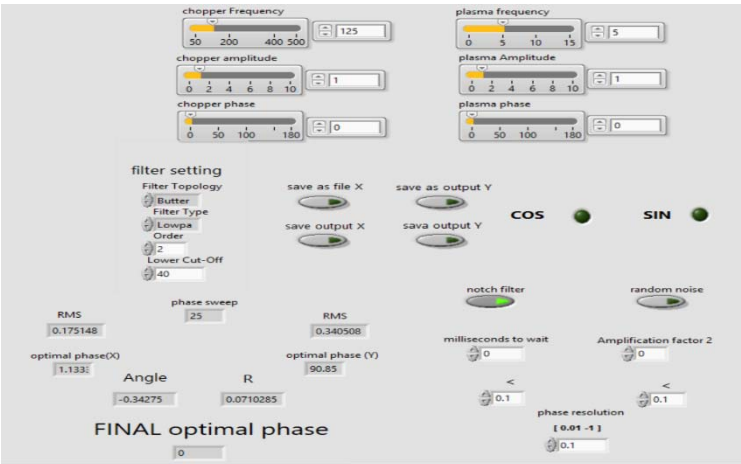
به طور کلی هدف از این شبیه‌سازی، بازیابی سیگنال اولیه به بهترین شکل ممکن است. در همهٔ مراحل این قسمت، سیگنالی با بسامد ۵ هرتز و دامنهٔ ۱ (شکل ۲) را به عنوان سیگنال ورودی مدنظر قرار می‌دهیم.

عوامل مهمی از جمله انتخاب مناسب بسامد مدولاسیون، حد پایین صافی و انتخاب نوع صافی می‌توانند در کیفیت سیگنال بازیابی شده تأثیرگذار باشند. در این تحقیق، کار بازیابی سیگنال در شرایط مختلف نسبت سیگنال به نوفه (شکل ۳) انجام شد و نتایج قابل توجهی به دست آمد.

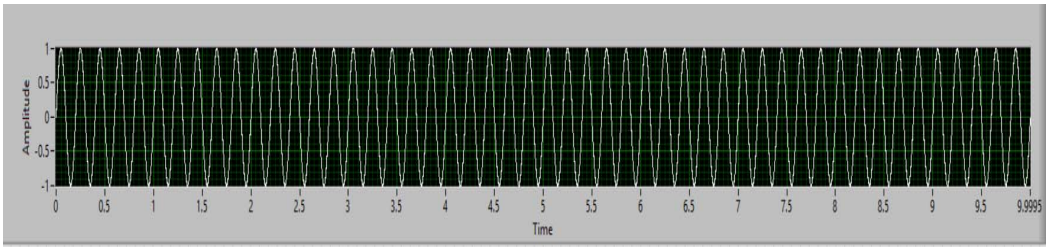
همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود؛ سیگنال بازیابی شده تطابق بسیار خوبی با سیگنال ورودی (شکل ۲) دارد. در مرحلهٔ بعد نسبت سیگنال به نوفه را کاهش داده و برنامه را مجدداً اجرا می‌کنیم. در این شرایط، در حالی که مطابق شکل ۵ نسبت سیگنال به نوفه حدود ۰/۱۲۵ بود، مطابق شکل ۶، سیگنال اولیه از میان نوفه‌های زیاد تا حد قابل توجهی بازیابی شد.

در این مرحله تطابق سیگنال بازیابی شده با سیگنال ورودی مقداری مشکل به نظر می‌آید. از همین رو ممکن است این سؤال در ذهن کاربر به وجود آید که آیا سیگنال بازیابی شده همان سیگنال ورودی است؟ برای پاسخ به این سؤال می‌توانیم تبدیل فوریه‌های سیگنال اولیه و سیگنال بازیابی شده را با استفاده از نرم‌افزار لب‌ویو انجام دهیم و با مقایسهٔ آنها از صحت عملکرد کد شبیه‌سازی شده اطمینان حاصل کنیم. این تبدیلات فوریه به ترتیب در شکل های ۷ و ۸ قابل مشاهده‌اند. همان طور که دیده می‌شود در تبدیل فوریهٔ به دست آمده، قله‌های مربوط به نوفه‌های باقی‌مانده قابل چشم‌پوشی هستند.

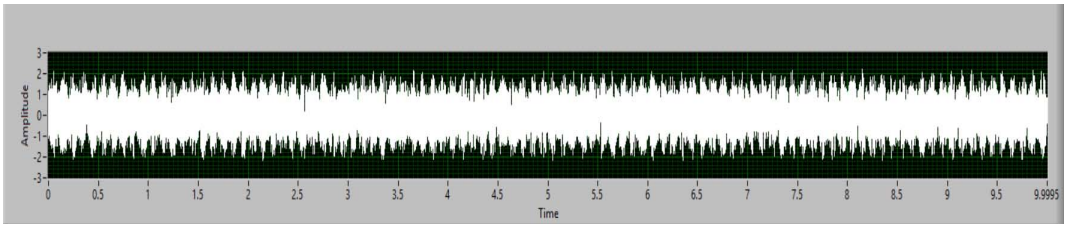




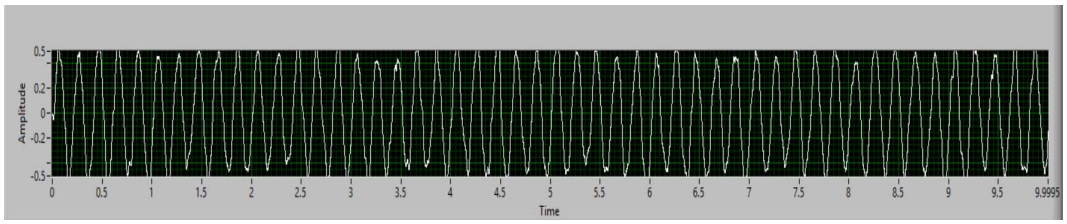
شکل ۱. نمایی از بلوک دیاگرام و پنجرهٔ کاربری تقویت کنندهٔ قفل فازی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار لب‌ویو.



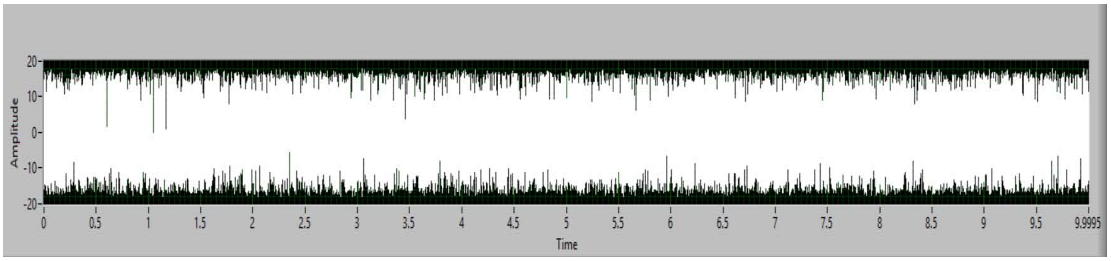
شکل ۲ . سیگنال اولی‌ه.



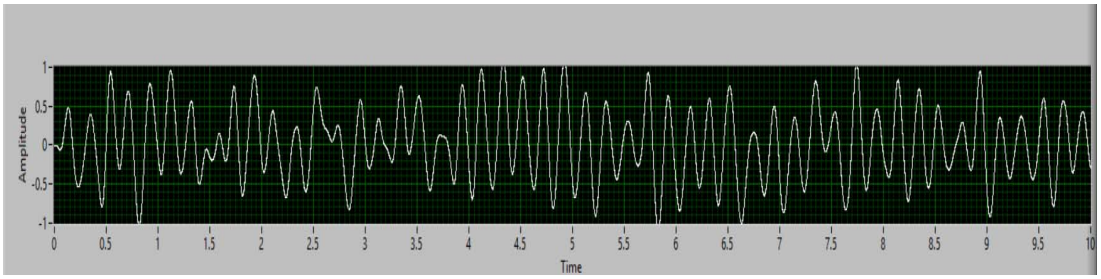
شکل ۳. نمودار سیگنال مدوله شده همراه با نوفه در شرایط: SNR = ۰/۸.



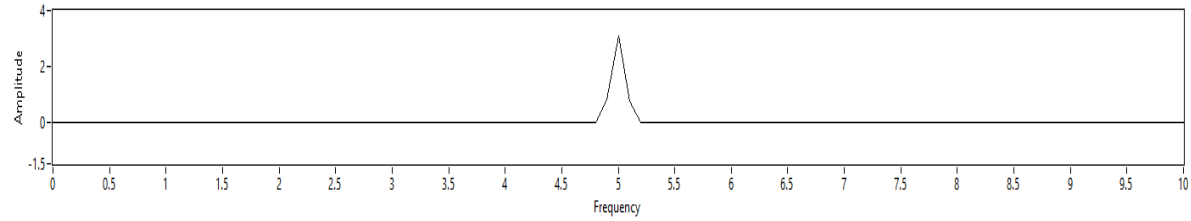
شکل ۴. نمودار خروجی تقویت کنندهٔ قفل فازی نرم‌افزاری در شرایط: SNR = ۰/۸.



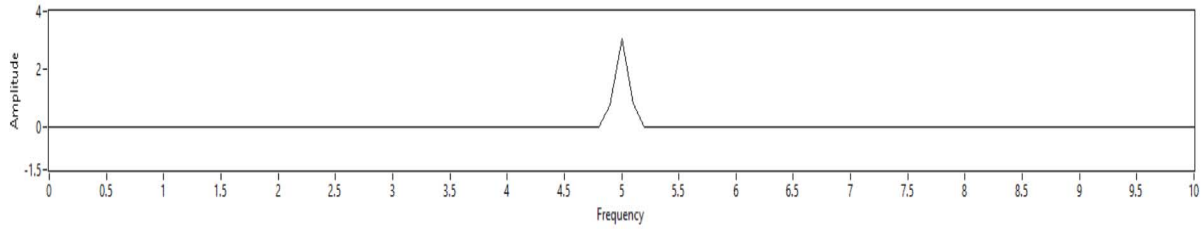
شکل ۵. نمودار سیگنال مدوله شده همراه با نوفه در شرایط: SNR = ۰/۱۲۵.



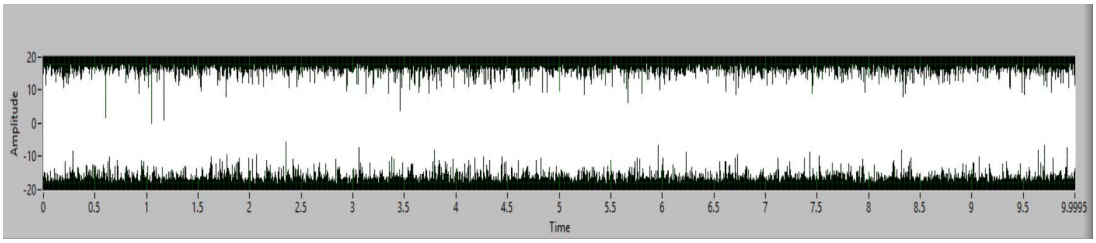
شکل ۶. نمودار خروجی تقویت‌کننده قفل فازی نرم‌افزاری در شرایط: SNR =.۰/۱۲۵.



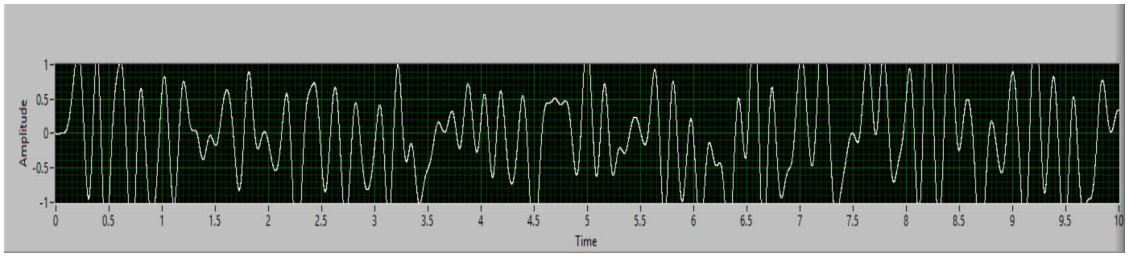
شکل ۷. تبدیل فوریهٔ سیگنال ورودی.



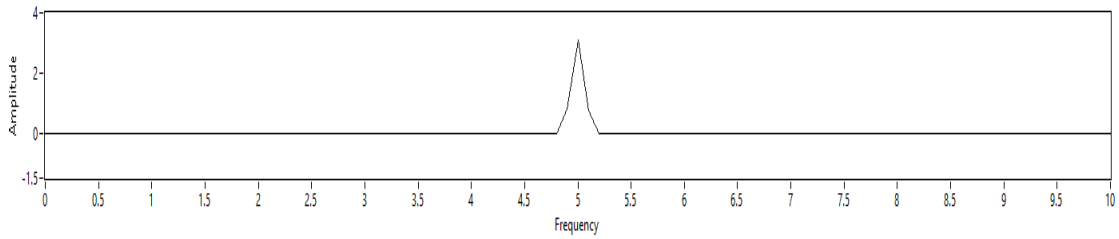
شکل ۸. تبدیل فوریهٔ سیگنال بازیابی شده در شرای‌ط ۰/۱۲۵= SNR.



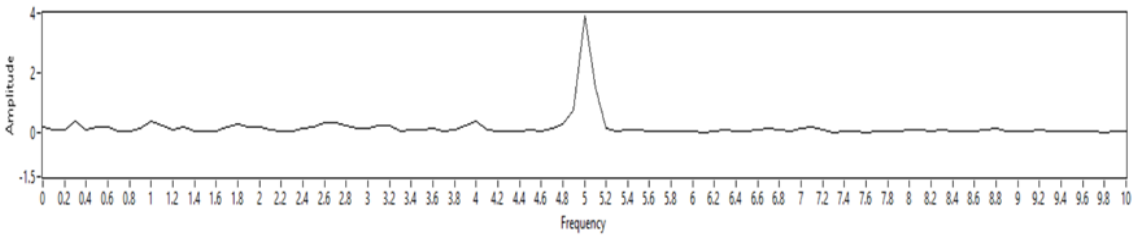
شکل ۹. نمودار سیگنال مدوله شده همراه با نوفه در شرایط ۰/۰۵ = SNR.



شکل ۱۰. نمودار خروجی تقویت کنندهٔ قفل فازی نرم‌افزاری در شرایط ۰/۰۵= SNR.



شکل ۱۱. تبدیل فوریهٔ سیگنال ورودی.



شکل ۱۲. تبدیل فوریهٔ سیگنال خروجی در شرایط SNR =۰/۰۵.

قابل چشم پوشی بودن نوفه‌ها دال بر این است که کار بازیابی سیگنال به خوبی انجام شده است. در مرحلهٔ بعد یک قدم جلوتر می‌رویم و مطابق شکل ۹ نسبت سیگنال به نوفه را به ۰/۰۵ کاهش می‌دهیم و نتیجه (شکل ۱۰) را بررسی می‌کنیم.

در این مرحله باید به این نکته دقت کرد که نسبت سیگنال به نوفه ۰/۰۵ است و مسلماً نمی‌توان کیفیتی همانند زمانی که نسبت سیگنال به نوفه ۰/۱۲۵ بود را انتظار داشت. در اینجا نیز مانند قسمت قبل، برای اطمینان از صحت کد شبیه‌سازی شده به مقایسه‌ی تبدیل فوریه سیگنال ورودی (شکل ۱۱) و خروجی (شکل ۱۲) می‌پردازیم.

همان طور که واضح هست با مقایسهٔ شکل‌های ۱۱ و ۱۲ می‌توانیم به تطابق سیگنال اولیه و بازیابی شده پی ببریم. در تبدیل فوریه به دست آمده، قله‌های مربوط به نوفه‌های باقی‌مانده مقداری به چشم می‌آیند اما این مقدار اندک با توجه به نسبت سیگنال به نوفه بسیار کوچک‌تر از یک کاملاً قابل قبول است.

۵. نتیجه‌گیری

در مقالهٔ حاضر در شرایطی که نسبت سیگنال به نوفه بسیار کوچک‌تر از یک بود، کار بازیابی سیگنال با استفاده از برنامهٔ طراحی شده انجام شد و نتایج قابل توجهی به دست آمد. سیگنال بازیابی شده تطابق بسیار خوب و قابل قبولی با سیگنال اولیه داشت. با انجام آزمایش های مختلف به این نتیجه می‌توان رسید که تعیین انتخاب بسامد مدولاسیون و حد پایین صافی از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در نتیجهٔ شبیه‌سازی است.

مراجع

1. Amplifier, DSP Lock-In. "*MODEL SR810.*" (1993). Sunnyvale, CA, USA: Stanford Res. Syst.
2. G Vasilescu, "*Electronic noise and interfering signals: principles and applications",* Springer, Science & Business Media (2006).
3. C Qi, et al. "*Design of dual-phase lock-in amplifier used for weak signal detection"*. In Industrial Electronics Society, IECON 42nd Annual Conference of the IEEE, (2016).
4. Optics, "*USB2000+ Fiber Optic Spectrometer Installation and Operation Manual* (2011).