



Design and implementation of a frequency synthesizer based on phase-locked loop for using in radar applications

S. Zolfaqari Moqadam¹, M. Kazerooni^{2*}

*Associate Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received: 2023/09/07, Revised: 2023/11/14, Accepted: 2023/11/27, Published: 2023/12/22)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.1.9>

ABSTRACT

In most telecommunications and radar receivers, one or more local oscillators are used to convert the input frequency to the intermediate frequency. In an ideal receiver, this frequency conversion does not distort the input signal, and all the information on the signal can be recovered. In a real receiver, both the mixer used to convert the signal frequency and the local oscillator distort the signal, limiting the receiver's ability to recover the signal. Degradation caused by the mixer, such as undesirable mixed outputs, can be minimized by proper design in the rest of the receiver. The destruction caused by the local oscillator, which is usually random phase changes or phase noise, cannot be reduced except by improving the performance of the oscillator. The purpose of this paper is to design and implement a frequency synthesizer based on a phase-locked loop. The frequency synthesizer unit is used in all types of frequency-domain and time-domain radars. In frequency domain radars, the frequency synthesizer circuit can be used as a waveform generator or to generate a local oscillator signal. Also, in time-domain radars, with the aim of synchronizing different parts of the radar, a frequency synthesizer circuit is used. In this paper, a frequency synthesizer based on a phase-locked loop named ADF4350 is used. The output frequency of this part is set to 1 GHz. The circuit design of this part is done in ADIsimPLL software, and its board is drawn in Altium Designer software. In order to check more carefully before implementation, the phase-locked loop circuit is also simulated in ADS software. After design, the frequency synthesizer board has been built along with the power supply board, and the phase noise results have been measured. The measured phase noise matches the values in the datasheet for the part.

Keywords: Frequency Synthesizer, Phase-Locked Loop, Local Oscillator, Phase Noise

Cite this article: S. Zolfaqari Moqadam, M. Kazerooni "Design and implementation of a frequency synthesizer based on phase-locked loop for using in radar applications" Radar, vol.11, no.2, pp.1-8.

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.1.9>

© The Author(s).

Publisher: Imam Hosseini University

*Corresponding Author Email: kazerooni@mut.ac.ir



علمی - پژوهشی

طراحی و ساخت سنتر کننده فرکانسی مبتنی بر حلقه قفل فاز به منظور استفاده در کاربردهای

راداری

سودابه ذوالفقاری مقدم^{۱*}، مرتضی کازرونی^۲

۱- کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۸/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۶، انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.1.9>

چکیده

در بیشتر گیرنده‌های مخابراتی و راداری، از یک یا چند نوسانگر محلی برای تبدیل فرکانس ورودی به فرکانس میانی استفاده می‌کنند. در یک گیرنده ایدئال، این تبدیل فرکانسی، سیگنال ورودی را تحریف نمی‌کند و تمام اطلاعات روی سیگنال می‌تواند بازیابی شود. در یک گیرنده واقعی، هم ترکیب‌کننده استفاده‌شده برای تبدیل فرکانس سیگنال و هم نوسانگر محلی، سیگنال را تحریف کرده و توانایی گیرنده را برای بازیابی سیگنال محدود می‌کند. تخریب ناشی از ترکیب‌کننده، مانند خروجی‌های ترکیب‌شده نامطلوب، می‌تواند با طراحی مناسب در بقیه بخش‌های گیرنده به حداقل برسد. تخریب ناشی از نوسانگر محلی که معمولاً تغییرات فازی تصادفی یا همان نویز فاز است، جز با بهبود عملکرد نوسانگر کاهش نمی‌یابد. هدف از این مقاله، طراحی و ساخت یک سنتر کننده فرکانسی مبتنی بر حلقه قفل فاز است. واحد سنتر کننده فرکانسی در انواع رادارها، شامل رادارهایی که پردازش آن‌ها در حوزه زمان و یا در حوزه فرکانس انجام می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در رادارهایی که پردازش سیگنال در آن‌ها در حوزه فرکانس انجام می‌شود، مدار سنتر کننده فرکانسی می‌تواند به‌عنوان مولد شکل موج استفاده شود و یا به‌منظور تولید سیگنال نوسانگر محلی مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین در رادارهایی که پردازش سیگنال در آن‌ها در حوزه زمان انجام می‌شود، باهدف همگام‌سازی بخش‌های مختلف رادار، از مدار سنتر کننده فرکانس استفاده می‌شود. در این مقاله، از یک قطعه سنتر کننده فرکانسی مبتنی بر حلقه قفل فاز بانام ADF4350 استفاده شده است. فرکانس خروجی این قطعه روی 1GHz تنظیم شده است. طراحی مدار این قطعه در نرم‌افزار ADIsimPLL انجام شده و برد راه‌انداز آن در نرم‌افزار Altium Designer ترسیم شده است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر قبل از پیاده‌سازی، مدار حلقه قفل فاز در نرم‌افزار ADS نیز شبیه‌سازی شده است. پس از طراحی، برد سنتر کننده فرکانسی به همراه برد تغذیه ساخته شده و نتایج نویز فاز اندازه‌گیری شده است. نویز فاز اندازه‌گیری شده با مقادیر موجود در داده برگ قطعه منطبق است.

کلیدواژه‌ها: سنتر کننده فرکانسی، حلقه قفل فاز، نوسانگر محلی، نویز فاز.

۱. مقدمه

بیشینه نرخ خطای بی‌تی را که سامانه می‌تواند به دست آورد، محدود کند. نویز فاز می‌تواند بیشینه تفکیک‌پذیری زاویه‌ای را که می‌تواند توسط گیرنده جهت‌یاب تداخل‌سنج به دست آید، محدود کند. ترکیب متقابل ممکن است زمانی که سیگنال‌های قوی در نزدیکی فرکانس تنظیم‌شده گیرنده هستند، باعث افزایش کف نویز گیرنده شود. این موضوع توانایی بازیابی سیگنال‌های ضعیف را محدود می‌کند. تمام این اثرات ناشی از نویز فاز نوسانگر

نوسانگر با نویز فاز کم برای بسیاری از سامانه‌های گیرنده ضروری است. نویز فاز نوسانگر محلی، نسبت سیگنال به نویز نهایی را که می‌توان در هنگام دریافت یک سیگنال مدوله‌شده فرکانس یا مدوله‌شده فاز به دست آورد، محدود می‌کند. عملکرد برخی از انواع آشکارسازهای مدولاسیون دامنه نیز ممکن است توسط نویز فاز نوسانگر محلی کاهش یابد. هنگامی که گیرنده برای دریافت سیگنال‌های کلید زنی شیف‌ت فاز یا کلید زنی شیف‌ت فرکانس استفاده می‌شود، نویز فاز ممکن است

استناد: ذوالفقاری مقدم، سودابه، کازرونی، مرتضی "طراحی و ساخت سنتر کننده فرکانسی مبتنی بر حلقه قفل فاز به‌منظور استفاده در

کاربردهای راداری"، رادار، ۱۱(۲)، ۸-۱، ۱۴۰۲. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1402.11.2.1.9>

مدارهای واقعی کنترل شده توسط FPGA، در نهایت عملکرد خوبی را در نویز فاز و سرکوب سیگنال‌های مزاحم نشان می‌دهد.

در [۶]، یک سنتز کننده فرکانس ساده و جدید بررسی شده است که امکان تولید سیگنالی را در خروجی ممکن می‌سازد که فرکانس آن برابر با مجموع فرکانس‌های سیگنال‌های ورودی تقسیم بر یک ثابت است. نتایج شبیه‌سازی سنتز کننده در مقاله ارائه شده و توسط یک میکروکنترلر پیاده‌سازی شده است. در نهایت نتایج اندازه‌گیری نیز ارائه شده است. مزیت اصلی این سنتز کننده امکان ایجاد آن با برنامه‌نویسی در هر میکروکنترلر است.

در سامانه‌های راداری که پردازش سیگنال در آن‌ها در حوزه فرکانس انجام می‌شود، یک سنتز کننده فرکانس می‌تواند به عنوان یک مولد سیگنال استفاده شود و یا برای تولید نوسانگر محلی با مشخصات نویز فاز مطلوب استفاده شود. همچنین در سامانه‌های راداری که پردازش سیگنال در آن‌ها در حوزه زمان انجام می‌شود، پیاده‌سازی بخش‌های زمان بندی و همگام‌سازی سامانه می‌تواند با استفاده از یک سنتز کننده انجام شود. بدین ترتیب طراحی سنتز کننده فرکانسی مبتنی بر حلقه قفل فاز با مشخصات نویز فاز مطلوب اهمیت می‌یابد.

تاکنون مقالات زیادی به بررسی انواع ساختارهای سخت‌افزاری رادارها پرداخته‌اند؛ اما تعداد محدودی از آن‌ها به پیکربندی سخت‌افزاری رادار زمین نفوذ و به خصوص نوع هوا پایه آن اشاره کرده‌اند. رادار زمین نفوذ مانند انواع دیگر رادارها در دو حوزه زمان و فرکانس پیاده‌سازی می‌شود. یکی از متداول‌ترین انواع رادار زمین نفوذ در حوزه زمان، رادار ضربه‌ای است. به منظور بررسی منابع نویز فاز در این نوع رادار، مطالعاتی انجام شد، در نهایت مشخص شد به منظور هماهنگ‌سازی بخش‌های ارسال و دریافت پالس در این نوع رادارها در بیشتر موارد از یک سنتز کننده فرکانسی استفاده می‌شود که بیشترین تأثیر را در نویز فاز و جیت‌ر زمان بندی این نوع سامانه راداری دارد. در مقالات بررسی شده داخلی و خارجی تاکنون به این موضوع پرداخته نشده است.

از طرفی همان‌طور که در بیشتر مقالات اشاره شده است در رادارهایی که پردازش سیگنال در آن‌ها در حوزه فرکانس انجام می‌شود، از یک سنتز کننده فرکانسی به عنوان سیگنال نوسانگر محلی و همچنین مولد شکل موج سیگنال استفاده می‌شود که مهم‌ترین منبع نویز فاز در این نوع سامانه‌ها به حساب می‌آید. بدین ترتیب، قطعه سنتز کننده فرکانسی در هر دو نوع پردازش سیگنال‌های راداری، یعنی حوزه زمان و حوزه فرکانس، باید

محلی است و تنها با کاهش نویز فاز نوسانگر قابل کاهش است. [۱]

مدارهای حلقه قفل فاز در طیف گسترده‌ای از کاربردهای فرکانس بالا، در مدارهای ساده پاک‌سازی کلاک، تا نوسانگرهای محلی برای ارتباطات رادیویی با کارایی بالا وجود دارند. یک حلقه قفل فاز در ساده‌ترین پیکربندی خود، فاز یک سیگنال مرجع را با فاز یک سیگنال پس‌خورد قابل تنظیم مقایسه می‌کند. در این ساختار، یک حلقه کنترل پس‌خورد منفی وجود دارد که در حوزه فرکانس کار می‌کند. زمانی که مقایسه در حالت پایدار باشد و فرکانس و فاز خروجی با فرکانس و فاز ورودی آشکارساز خطا مطابقت داده شود، گفته می‌شود که حلقه قفل شده است [۲].

از طرفی با گسترش استفاده از روش‌های دیجیتال در سامانه‌های ارتباطی، یک روش کنترل دیجیتال برای تولید فرکانس‌های متعدد از یک منبع فرکانس مرجع، به نام سنتز دیجیتالی مستقیم تکامل یافته است. در این سنتز کننده، یک کلاک پایدار یک حافظه خواندنی قابل برنامه‌ریزی را تحریک می‌کند که یک یا چند عدد صحیح از چرخه‌های یک موج سینوسی یا هر شکل موج دلخواه دیگر را ذخیره می‌کند. با عبور شمارنده نشانی از هر مکان حافظه، دامنه دیجیتال متناظر سیگنال در هر مکان، یک مبدل دیجیتال به آنالوگ را تحریک کرده و در نهایت سیگنال خروجی آنالوگ را تولید می‌کند. خلوص طیفی سیگنال خروجی آنالوگ نهایی در درجه اول توسط مبدل دیجیتال به آنالوگ تعیین می‌شود. به‌طور اساسی نویز فاز مربوط به کلاک مرجع است [۳].

سنتز کننده‌های فرکانس مبتنی بر حلقه قفل فاز، برای مدت طولانی مورد علاقه طراحانی هستند که به فرکانس‌های بالا و پایین پایدار و قابل برنامه‌ریزی و منابع سیگنال یا کلاک با کیفیت بالا نیاز دارند. این قطعات به خوبی شناخته شده، ارزان بوده و به‌طور گسترده در دسترس هستند. اما کاربردهایی نیز وجود دارند که سنتز دیجیتالی مستقیم به‌عنوان یک راه‌حل ممکن ارزیابی می‌شود [۴].

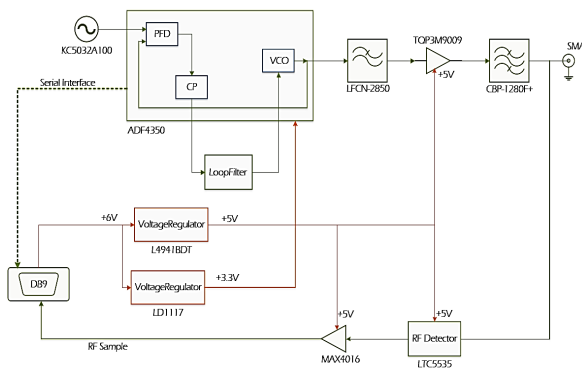
در [۵] طراحی و ساخت یک مرجع حلقه قفل فاز فرکانس پله‌ای بررسی شده است. ابتدا نویز فاز حلقه و همچنین اصول اولیه و مشخصات عملیاتی HMC703 مورد بحث قرار گرفته و سپس طراحی در Ku-band ارائه شده که از تراشه VCO خارجی برای تشکیل حلقه استفاده می‌کند. تعیین پارامترهای فیلتر حلقه و شبیه‌سازی نویز فاز توسط HITITE PLL Design انجام شده است. پس از پیاده‌سازی مدارهای سخت‌افزاری و نوشتن برنامه کنترل سیگنال، نتایج آزمایش

به طور معمول، کلاک ورودی با یک نوسانگر کریستالی تولید می‌شود و در نتیجه، حتی پس از M برابر شدن، نویز فاز بسیار پایینی دارد. در نتیجه مرجع ورودی، نویز فاز خروجی را فقط در فرکانس‌های انحراف بسیار پایین تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نویز فاز نوسانگر کنترل شده با ولتاژ قفل شده معمولاً زیاد است و بیشتر انرژی آن در فرکانس‌های پایین است. بنابراین تابع تبدیل بالا گذر حلقه قفل فاز بسیار راحت است و به طور مؤثر عملکرد کلی نویز فاز را به طور زیادی بهبود می‌بخشد. بلوک‌های داخلی حلقه قفل فاز، به ویژه آشکارساز فاز، نویز اضافی تولید می‌کنند که با تابع تبدیل پایین گذر، مشابه مرجع کلاک ورودی، به خروجی منتقل می‌شوند.

۳. شبیه‌سازی سنتز کننده فرکانسی مبتنی بر حلقه قفل فاز و طراحی برد مدار چاپی

در این بخش، مدار مرتبط با سنتز کننده فرکانسی ADF4350 در نرم‌افزار ADIsimPLL که از نرم‌افزارهای شرکت Analog Devices است، شبیه‌سازی شده و برای قفل شده حلقه قفل فاز داخلی آن روی فرکانس 1GHz، فیلتر حلقه آن طراحی شده است. شبیه‌سازی حلقه قفل فاز بار دیگر در نرم‌افزار ADS نیز شبیه‌سازی شده و پارامترهای آن مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت طراحی مدار برد سنتز کننده فرکانس و برد تغذیه آن در نرم‌افزار Altium Designer ترسیم گردیده است. نمودار بلوکی مدار طراحی شده در شکل (۱) مشاهده می‌شود.



شکل (۱). نمودار بلوکی مدار سنتز کننده فرکانس ساخته شده

۳-۱ طراحی حلقه قفل فاز در نرم‌افزار ADIsimPLL

به منظور طراحی دقیق حلقه و استخراج مقادیر قطعات فیلتر حلقه به گونه‌ای که حلقه در فرکانس 1GHz قفل کند، از نرم‌افزار ADIsimPLL استفاده شده است. این نرم‌افزار توسط شرکت Analog Devices برای طراحی و شبیه‌سازی حلقه‌های قفل فاز این شرکت ارائه شده است. طرح‌واره مدار طراحی شده در شکل (۲) نشان داده شده است. فرکانس نوسانگر مرجع در این طراحی 100MHz است. همان‌طور که از نمودار نویز فاز مطابق شکل (۳) مشخص است،

به گونه‌ای انتخاب شود که کمترین میزان نویز فاز را به سامانه تزریق کرده و کمترین تخریب را در حساسیت گیرنده رادار زمین نفوذ هوا پایه ایجاد کند.

در این مقاله، یک قطعه سنتز کننده فرکانس مبتنی بر حلقه قفل فاز، پر کاربرد در صنعت رادار بانام تجاری ADF4350، انتخاب شده و به منظور استفاده در کاربردهای راداری طراحی و ساخته شده است. به منظور قفل کردن این قطعه در فرکانس 1GHz، فیلتر حلقه مناسب در نرم‌افزار ADIsimPLL طراحی شده و پارامترهای خروجی قطعه مشاهده شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر طراحی، مدار حلقه قفل فاز در نرم‌افزار ADS نیز شبیه‌سازی شده است.

در نهایت برد مدار سنتز کننده فرکانسی به همراه برد تغذیه آن در نرم‌افزار Altium Designer ترسیم شده و برد مدار چاپی مورد نظر ساخته شده است. همچنین مقادیر نویز فاز سیگنال خروجی از سنتز کننده فرکانس با استفاده از دستگاه Spectrum Analyzer اندازه‌گیری شده و با مقادیر ارائه شده در داده برگ قطعه تطبیق داده شده است.

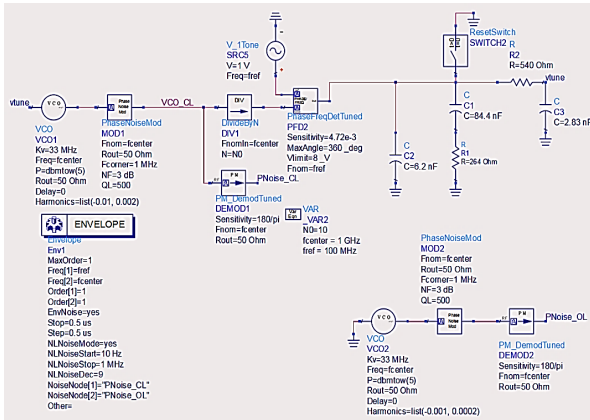
۲. نویز فاز در خروجی حلقه قفل فاز

نویز فاز یک نوسانگر از دو ناحیه اصلی تشکیل شده است. ناحیه بزرگ‌تر به دلیل نویز حرارتی است که تأثیری شبیه مدولاسیون فرکانس دارد و بنابراین باندهای جانبی را تولید می‌کند که متناسب با عکس انحراف فرکانسی، کاهش می‌یابند. این باندهای جانبی در نمودار لگاریتمی نویز فاز، شیب -20 dB/dec را ایجاد می‌کنند. در انحراف فرکانسی پایین، ناحیه‌ای با شیب -30 dB/dec به دلیل تبدیل نویز $1/f$ به بالا وجود دارد.

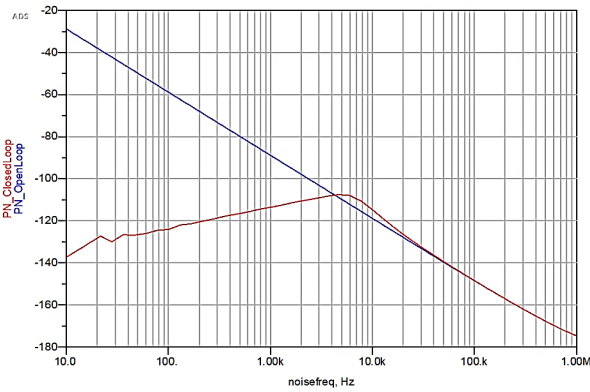
یک حلقه قفل فاز به عنوان یک فیلتر پایین گذر برای نویز فاز مرجع کلاک ورودی و به عنوان یک فیلتر بالا گذر برای نوسانگر کنترل شده با ولتاژ قفل شده عمل می‌کند. در مورد مرجع کلاک ورودی، حلقه قفل فاز یک بهره M ، برابر با نسبت فرکانس خروجی به فرکانس ورودی اعمال می‌کند. با در نظر گرفتن $\Phi_{in}(f)$ به عنوان نویز فاز مرجع کلاک ورودی و $\Phi_{VCO}(f)$ به عنوان نویز فاز نوسانگر کنترل شده با ولتاژ قفل شده، نویز فاز خروجی به صورت زیر خواهد بود:

$$\Phi_{out}(f) = \frac{M}{\sqrt{1 + \frac{f}{F_{Loop}}}} \Phi_{in}(f) + \sqrt{1 + \frac{f}{F_{Loop}}} \Phi_{VCO}(f) \quad (1)$$

نوسانگر کنترل شده با ولتاژ وارد شبیه سازی می شود. فرکانس خروجی مدار در این طراحی برابر با 1GHz در نظر گرفته شده است.



شکل (۴). طرح واره حلقه قفل فاز شبیه سازی شده در نرم افزار ADS با در نظر گرفتن نویز فاز نوسانگر کنترل شده با ولتاژ



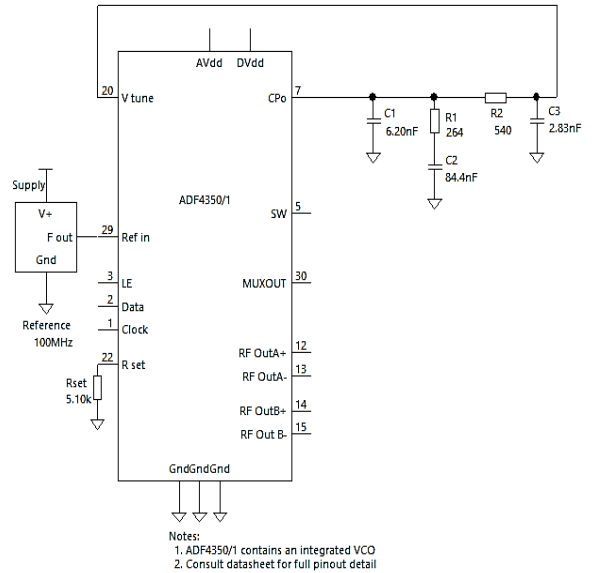
شکل (۵). نمودار نویز فاز نوسانگر کنترل شده با ولتاژ در دو حالت حلقه باز و حلقه بسته

نتایج این شبیه سازی که در نمودار شکل (۵) مشاهده می شود، نشان می دهد که نویز فاز VCO در حالت حلقه باز، در انحراف فرکانسی های پایین، بسیار بیشتر از حالتی است که در حلقه بسته قرار گرفته است. مطابق با این نمودار پیش بینی می شود نویز فاز حلقه در انحراف فرکانسی های بالا توسط نوسانگر کنترل شده با ولتاژ محدود شود.

در ادامه سهم نویز فاز همه قطعات استفاده شده در حلقه قفل فاز به صورت تقریبی و با استفاده از داده برگ قطعه سنتز کننده فرکانس، وارد شبیه سازی شده که طرح واره آن مطابق با شکل (۶) است.

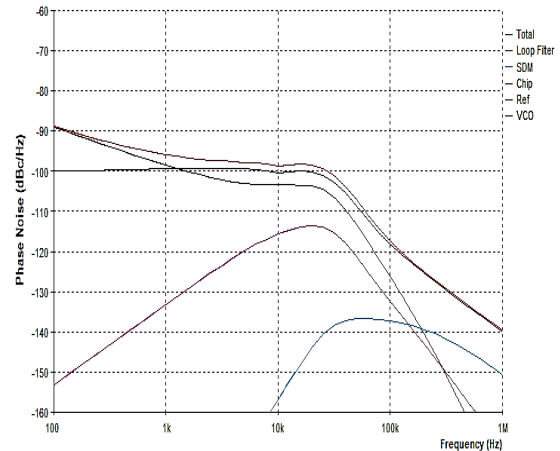
نتایج این شبیه سازی، در شکل (۷) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود نویز فاز کلی حلقه قفل فاز در انحراف فرکانسی های پایین توسط نوسانگر مرجع و در انحراف فرکانسی های بالا توسط نوسانگر کنترل شده با ولتاژ محدود می شود.

نویز فاز در انحراف فرکانسی های بالا توسط نوسانگر کنترل شده با ولتاژ محدود می شود. در این طراحی نویز فاز نوسانگر مرجع وارد نشده است.



شکل (۲). طرح واره مدار سنتز کننده فرکانس شبیه سازی شده در

نرم افزار ADIsimPLL

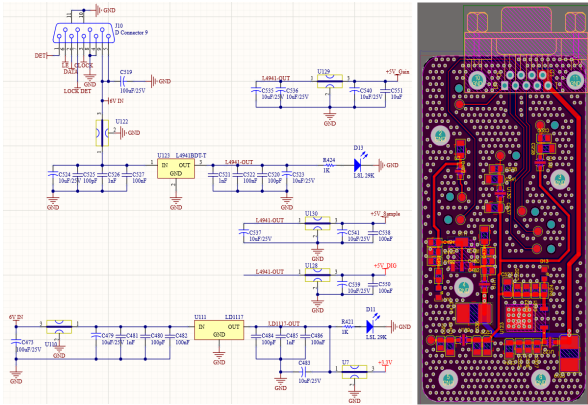


شکل (۳). نمودار نویز فاز سنتز کننده فرکانس ADF4350 در فرکانس 1GHz

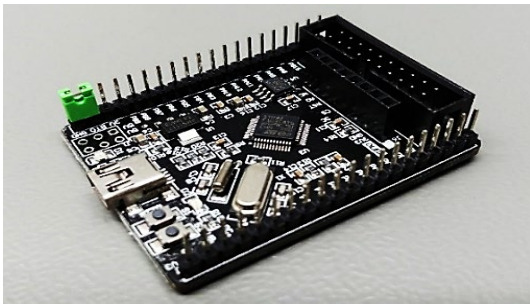
۲-۳. طراحی حلقه قفل فاز در نرم افزار ADS

برای پیاده سازی قطعه ADF4350 به صورت حلقه قفل فاز، باید از یک فیلتر حلقه خارجی و یک فرکانس مرجع خارجی استفاده شود. این قطعه دارای یک VCO داخلی است که بازه فرکانس خروجی آن 2200 تا 4400MHz است و با استفاده از تقسیم کننده های داخلی، می توان فرکانس های پایین تر را نیز در خروجی قطعه تولید کرد. کنترل قطعه و تنظیم فرکانس خروجی آن، با استفاده از سه خط کنترل دیجیتال انجام می شود. به منظور تفسیر بهتر مدار، شبیه سازی حلقه قفل فاز در نرم افزار ADS انجام شده است. در ابتدا همان طور که در شکل (۴) نشان داده شده است، فقط نویز فاز

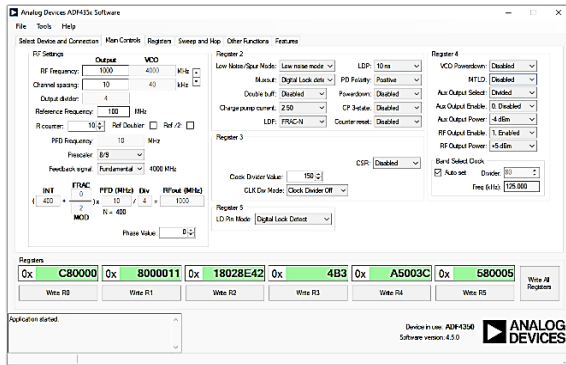
مقدار رجیسترهای سنتز کننده فرکانس ADF4350 را می‌توان از رابط کاربری ارائه‌شده توسط شرکت Analog Devices استخراج کرد، به‌طور نمونه تنظیمات رجیسترها برای راه‌اندازی سنتز کننده در فرکانس 1GHz به‌صورت نشان داده‌شده در شکل (۱۲) است. تنظیمات قطعه به‌گونه‌ای انجام می‌شود که فرکانس مطلوب در خروجی آن، با استفاده از فرکانس مرجع استفاده‌شده، به‌طور دقیق تولید شود.



شکل (۱۰). طرح‌واره و برد مدار چاپی تغذیه



شکل (۱۱). برد دیجیتال STM32F103C8T6



شکل (۱۲). اعمال تنظیمات قطعه سنتز کننده فرکانس و استخراج مقدار رجیستری‌ها

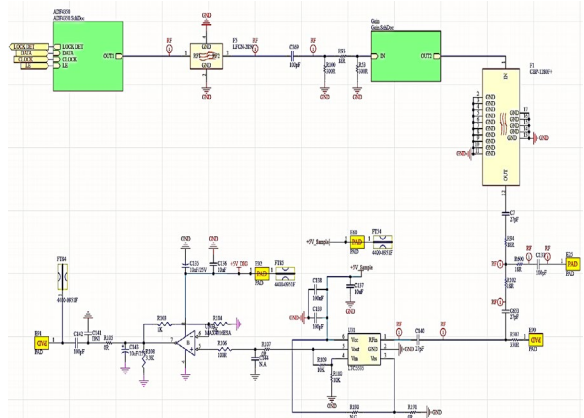
پس از تعیین مقدار رجیستری‌ها، باید مطابق با آنچه در داده برگ قطعه بیان شده است، این مقادیر به قطعه ارسال شوند. برای نوشتن مقادیر رجیستری‌ها روی قطعه، یک رابط سریال ساده سازگار با SPI تعبیه‌شده است. در این ارتباط

۳-۳. طراحی برد مدار چاپی سنتز کننده فرکانسی و برد تغذیه

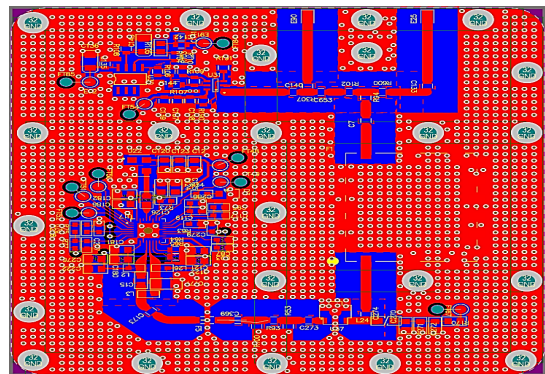
طرح‌واره مدار سنتز کننده فرکانس که در نرم‌افزار Altium Designer طراحی شده است، در شکل (۸) نشان داده شده است. برد مدار چاپی مربوط به این طرح‌واره نیز در شکل (۹) مشاهده می‌شود.

به‌منظور تأمین تغذیه سنتز کننده فرکانس و دیگر قطعات استفاده‌شده در این برد، یک برد تغذیه شامل رگلاتورهای L4941BDT و LD1117-3.3 نیز ساخته شده است. مدار برد تغذیه و برد مدار چاپی آن در شکل (۱۰) نشان داده شده است. ولتاژ ورودی به برد تغذیه 6V در نظر گرفته شده که توسط رگلاتور L4941BDT به 5V تبدیل شده و ولتاژ بخش‌های مختلف مدار را تأمین می‌کند.

برای راه‌اندازی قطعه سنتز کننده فرکانس، همان‌طور که در داده برگ آن ذکر شده است، داده‌های رجیستری‌ها به‌وسیله ارتباط سریال به قطعه ارسال می‌شود. این ارتباط از طریق پایه‌های CLK، DATA، LE برقرار می‌شود. برای ارتباط با قطعه به‌منظور تنظیم فرکانس و دیگر مشخصات، از میکروکنترلر STM32F103C8T6 استفاده شده است که برد آموزشی آن مطابق شکل (۱۱) در بازار ایران موجود است.



شکل (۸). طرح‌واره مدار سنتز کننده فرکانس طراحی شده

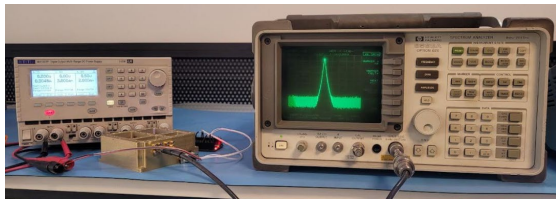


شکل (۹). پیاده‌سازی برد مدار چاپی سنتز کننده فرکانس طراحی شده

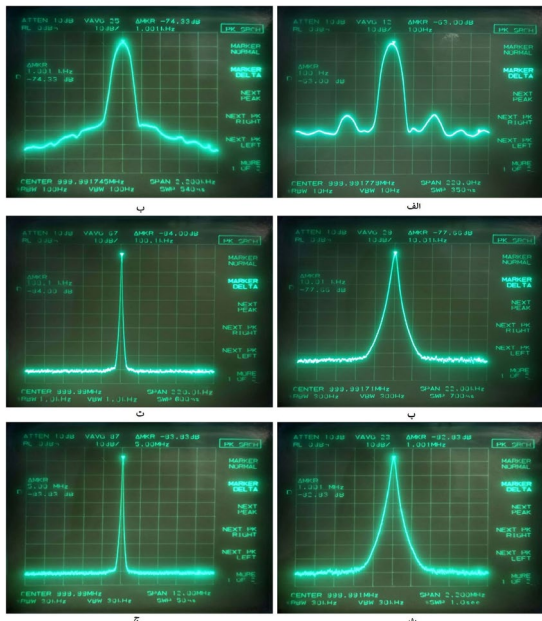
(۱۵) است. ولتاژ اعمالی به واحد سنتر کننده فرکانس، ۷۶ و جریان کشی آن در حدود ۳۰۰ mA است.

سیگنال خروجی از واحد سنتر کننده فرکانس در انحراف فرکانسی‌های مختلف توسط دستگاه تحلیل گر طیف اندازه‌گیری شده است. نتایج به صورت نشان داده شده در شکل (۱۶) است. برای محاسبه مقدار نویز از روی مقادیر اندازه‌گیری شده کافی است اختلاف توان حامل و نویز در انحراف فرکانسی مورد نظر محاسبه شده و با مقدار $10 \log RBW$ در آن اندازه‌گیری جمع شود. مقدار اختلاف توان حامل و نویز در شکل با نشانگر دستگاه تحلیل گر طیف مشخص شده است. RBW نیز یکی از پارامترهای قابل تنظیم در دستگاه اندازه‌گیری است که دقت فرکانس را تغییر می‌دهد.

مطابق با اندازه‌گیری‌های انجام شده، نویز فاز سیگنال خروجی در انحراف فرکانسی‌های مختلف در جدول (۱) محاسبه شده است. با استفاده از مقادیر به دست آمده برای نویز فاز، نمودار نویز فاز یک طرفه مطابق با شکل (۱۷) ترسیم شده است.



شکل (۱۵)، چیدمان اندازه‌گیری نویز فاز خروجی واحد سنتر کننده فرکانس

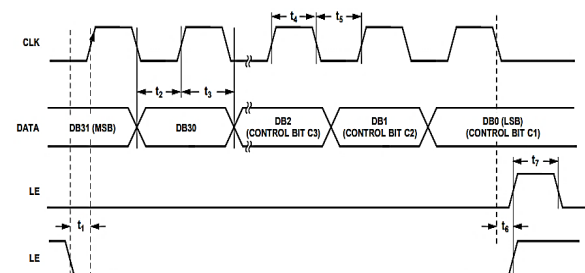


شکل (۱۶). نتایج اندازه‌گیری نویز فاز سیگنال خروجی واحد سنتر کننده فرکانس ساخته شده در انحراف فرکانسی؛ الف، 100Hz؛ ب، 1kHz؛ پ، 10kHz؛ ت، 100kHz؛ ث، 1MHz؛ ج، 5MHz

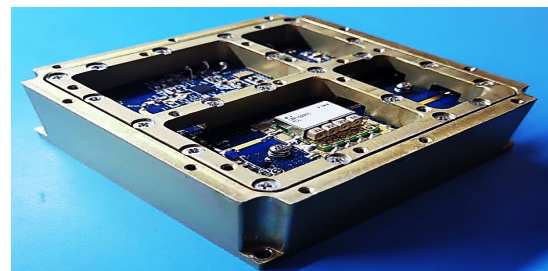
سریال، قطعه سنتر کننده فرکانس به عنوان slave و برد دیجیتال مذکور به عنوان master به کار گرفته می‌شوند. این ارتباط در حالتی که پین CE در سنتر کننده فرکانس در وضعیت یک منطقی باشد، از طریق سه خط CLK، DATA و LE برقرار خواهد شد. به این صورت که خط LE در وضعیت صفر منطقی قرار داده و با ارسال کلاک روی خط CLK، دیتایی که روی خط DATA قرار می‌گیرد، متناسب با ترتیب ذکر شده در داده برگ و مطابق با شکل (۱۳) در داخل قطعه پیکربندی می‌شود. در نهایت متناسب با مقادیر رجیسترهای اعمال شده، فرکانس سیگنال خروجی و دیگر پارامترهای آن تنظیم خواهد شد.

۴. ساخت سنتر کننده فرکانسی و بررسی نتایج نویز فاز خروجی آن

پس از طراحی و چاپ برد مدار چاپی سنتر کننده فرکانس و برد تغذیه، مونتاژ قطعات روی برد انجام شد و به منظور نظم دهی به مجموعه سنتر کننده فرکانس، یک جعبه آلومینیومی متناسب با ابعاد برد در نرم افزار SolidWorks طراحی و ساخته شده است. واحد جمع شده در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۱۳). نمودار زمان بندی انتقال دیتا به قطعه سنتر کننده فرکانس از طریق ارتباط SPI



شکل (۱۴). پیاده سازی واحد سنتر کننده فرکانس

۴-۱. اندازه‌گیری نویز فاز سیگنال خروجی سنتر کننده فرکانس

به منظور بررسی مقادیر نویز فاز خروجی این سنتر کننده فرکانس، از دستگاه اندازه‌گیری Spectrum Analyzer استفاده شده است. چیدمان اندازه‌گیری مطابق با شکل

۵. نتیجه گیری

در این مقاله، یک قطعه سنتز کننده فرکانس مبتنی بر حلقه قفل فاز طراحی و پیاده سازی شد. فیلتر حلقه این قطعه که بانام تجاری ADF4350 شناخته می شود، برای قفل شدن در فرکانس 1GHz طراحی گردید. به منظور بررسی دقیق تر نویز فاز، مدار حلقه قفل فاز در نرم افزار ADS نیز شبیه سازی شد. در نهایت برد سنتز کننده فرکانس به همراه برد تغذیه ساخته شده و نویز فاز سیگنال خروجی 1GHz اندازه گیری شد. مقدار نویز فاز سیگنال خروجی سنتز کننده فرکانس، در انحراف فرکانسی های پایین، در محدوده 100Hz تا 1MHz، مطابق با مقادیر مورد انتظار است که مقدار مناسبی برای استفاده در سخت افزارهای راداری متداول است. متناسب با کاربرد رادار مورداستفاده، محدوده مقادیر نویز فاز در انحراف فرکانسی های بالا و پایین، می تواند تعیین شود و در نتیجه قطعه سنتز کننده مناسب آن مورداستفاده قرار گیرد.

۶. مراجع

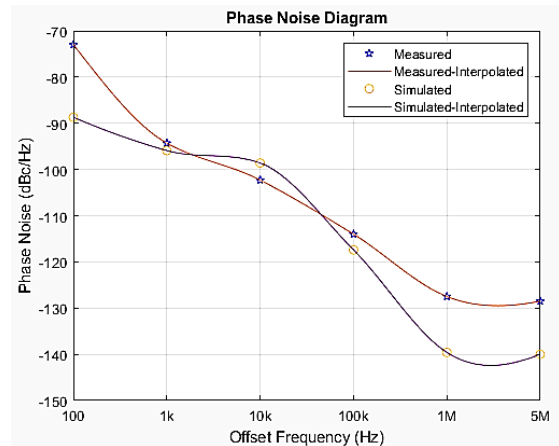
- [1] C. J. Grebenkemper, "Local oscillator phase noise and its effect on receiver performance," Watkins-Johnson Company Tech-notes, Vol. 8, No. 6, 1981.
- [2] I. Collins, "Phase-Locked Loop (PLL) Fundamentals," SSB, Vol. 130, No. 140, p. 150, 2018.
- [3] Analog Device, "Fundamentals of Direct Digital Synthesis (DDS)," <https://www.analog.com/MT-085>, 2009.
- [4] Analog Device, "Section 8. Replacing or Integrating PLL's with DDS Solutions," <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Technical-Tutorial-DDS>, 1999.
- [5] H. Wang and D. Guo and L. Wang, "Design and implementation of Ku-band frequency synthesizer," International Conference on Integrated Circuits and Microsystems, 2016, doi: 10.1109/ICAM.2016.7813570.
- [6] M. Stork, "Software Implementation of a Simple All-Digital Frequency Synthesizer," 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), 2023, doi: 10.1109/MECO58584.2023.10154909.

نقاط مشخص شده در شکل معادل با مقادیر اندازه گیری شده و خط ترسیم شده، نمودار نویز فاز حاصل از درون یابی همین نقاط است.

همان طور که از نتایج مشخص است، در انحراف فرکانسی های بیشتر از 1MHz مقدار نویز فاز محاسبه شده در حدود -128 dBc/Hz است که این موضوع به دلیل محدودیت های اندازه گیری ایجاد شده توسط دستگاه تحلیل گر طیف است. لازم به ذکر است که مقادیر انحراف فرکانسی برای اندازه گیری نویز فاز به صورت متعارف مطابق با جدول (۱) است، در داده برگ این قطعه نیز به همین مقادیر انحراف فرکانسی اشاره شده است.

جدول (۱). محاسبه نویز فاز از نتایج اندازه گیری با دستگاه تحلیل گر طیف

نویز فاز (dBc/Hz)	انحراف فرکانسی (Hz)
-73	100
-94.3	1k
-102.3	10k
-114	100k
-127.5	1M
-128.5	5M



شکل (۱۷). مقایسه نویز فاز اندازه گیری شده و شبیه سازی شده