



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

S. Zolfaqari Moqadam^{id}, M. Kazerooni^{id*}

*Associate Professor, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
(Received: 2023/10/08, Revised: 2023/12/14, Accepted: 2023/12/23, Published: 2024/01/21)

DOR: <https://dorl.net/dor/>

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.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



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

علمی - پژوهشی

طراحی و ساخت سنتزکننده فرکانسی مبتنی بر حلقه قفل فاز به منظور استفاده در کاربردهای راداری

سودابه ذوالفقاری مقدم^۱، مرتضی کازرونی^۲

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

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۶، انتشار: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱)

DOR:



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

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 ایده‌آل، 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 سنتزکننده فرکانسی مبتنی بر حلقه قفل فاز است. واحد سنتزکننده 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 سنتزکننده 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 سنتزکننده فرکانس استفاده می‌شود. در این مقاله، از یک قطعه سنتزکننده فرکانسی مبتنی بر حلقه قفل فاز با نام 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 سنتزکننده 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: سنتزکننده فرکانسی، حلقه قفل فاز، نوسانگر محلی، نویز فاز.۱- مقدمه^۱

نوسانگر محلی کاهش یابد. هنگامی که گیرنده برای دریافت سیگنال‌های کلیدزنی شیف‌ت فاز یا کلیدزنی شیف‌ت فرکانس استفاده می‌شود، نویز فاز ممکن است 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

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

نویز فاز نوسانگر 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 سنتزکننده، 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. به طور اساسی نویز فاز مربوط به کلاک مرجع است [۳].

سنتزکننده‌های فرکانس مبتنی بر حلقه قفل فاز، برای مدت طولانی موردعلاقه طراحانی هستند که به فرکانس‌های بالا و پایین پایدار و قابل برنامه‌ریزی و منابع سیگنال یا کلاک باکیفیت بالا نیاز دارند. این قطعات به‌خوبی شناخته‌شده، ارزان بوده و به طور 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 موردبحث 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 مدارهای واقعی کنترل شده توسط FPGA، در نهایت عملکرد خوبی را در نویز فاز و سرکوب سیگنال‌های مزاحم نشان می‌دهد.

در [۶]، یک سنتزکننده 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 تقسیم‌بر یک ثابت است. نتایج شبیه‌سازی سنتزکننده در مقاله ارائه شده و توسط یک میکروکنترلر پیاده‌سازی شده است. در نهایت نتایج اندازه‌گیری نیز ارائه شده است. مزیت اصلی این سنتزکننده امکان ایجاد آن با برنامه‌نویسی در هر میکروکنترلر است.

در سامانه‌های راداری که پردازش سیگنال در آن‌ها در حوزه فرکانس انجام می‌شود، یک سنتزکننده فرکانس می‌تواند به‌عنوان 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 زمان‌بندی و همگام‌سازی سامانه می‌تواند با استفاده از یک سنتزکننده انجام شود. بدین ترتیب طراحی سنتزکننده 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 به‌خصوص 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. به‌منظور بررسی منابع نویز فاز در این نوع رادار، مطالعاتی انجام شد، در نهایت مشخص شد به‌منظور هماهنگ‌سازی بخش‌های ارسال و دریافت پالس در این نوع رادارها در بیشتر موارد از یک سنتزکننده فرکانسی استفاده می‌شود که بیشترین تأثیر را در نویز فاز و جیت‌ر زمان‌بندی این نوع سامانه راداری دارد. در مقالات بررسی‌شده داخلی و خارجی تاکنون به این موضوع پرداخته نشده است.

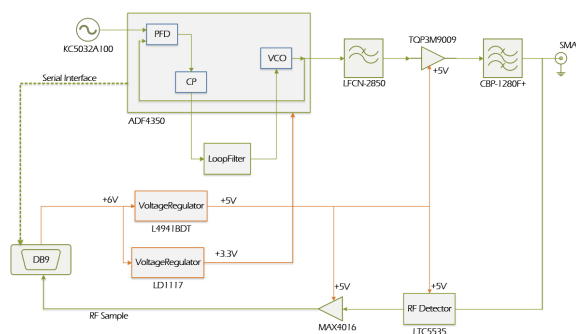
از طرفی همان‌طور که در بیشتر مقالات اشاره شده است در رادارهایی که پردازش سیگنال در آن‌ها در حوزه فرکانس انجام می‌شود، از یک سنتزکننده فرکانسی به‌عنوان سیگنال نوسانگر محلی و همچنین مولد شکل موج سیگنال استفاده می‌شود که مهم‌ترین منبع نویز فاز در این نوع سامانه‌ها به‌حساب می‌آید. بدین ترتیب، قطعه سنتزکننده فرکانسی در هر دو نوع پردازش سیگنال‌های راداری، یعنی حوزه زمان و حوزه فرکانس، باید به‌گونه‌ای 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 سنتزکننده فرکانس مبتنی بر حلقه قفل فاز، پرکاربرد در صنعت رادار با نام تجاری ADF4350، انتخاب شده و به‌منظور استفاده در کاربردهای راداری طراحی و ساخته شده است.

بلوک‌های داخلی حلقه قفل فاز، به‌ویژه آشکارساز فاز، نویز اضافی تولید می‌کنند که با تابع تبدیل پایین گذر، مشابه مرجع کلاک ورودی، به خروجی منتقل می‌شوند.

۳- شبیه‌سازی سنتزکننده فرکانسی مبتنی بر حلقه قفل فاز و طراحی برد مدار چاپی

در این بخش، مدار مرتبط با سنتزکننده فرکانسی ADF4350 در نرم‌افزار ADIsimPLL که از نرم‌افزارهای شرکت Analog Devices است، شبیه‌سازی شده و برای قفل شدن 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 موردبررسی قرار گرفته است. در نهایت طراحی مدار برد سنتزکننده 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 سنتزکننده فرکانس ساخته شده.

۳-۱ طراحی حلقه قفل فاز در نرم‌افزار ADIsimPLL

به‌منظور طراحی دقیق حلقه و استخراج مقادیر قطعات فیلتر حلقه به‌گونه‌ای 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، نویز فاز در انحراف فرکانسی‌های بالا توسط نوسانگر کنترل شده با ولتاژ محدود می‌شود. در این طراحی نویز فاز نوسانگر مرجع وارد نشده است.

به‌منظور قفل کردن این قطعه در فرکانس 1GHz، فیلتر حلقه مناسب در نرم‌افزار ADIsimPLL طراحی شده و پارامترهای خروجی قطعه مشاهده شده است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر طراحی، مدار حلقه قفل فاز در نرم‌افزار ADS نیز شبیه‌سازی شده است. در نهایت برد مدار سنتزکننده فرکانسی به همراه برد تغذیه آن در نرم‌افزار Altium Designer ترسیم شده و برد مدار چاپی موردنظر ساخته شده است. همچنین مقادیر نویز فاز سیگنال خروجی از سنتزکننده 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

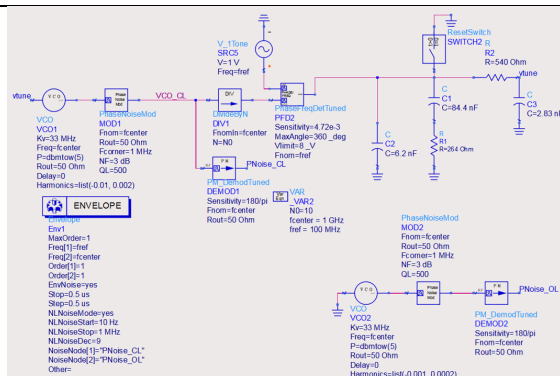
نویز فاز یک نوسانگر از دو ناحیه اصلی تشکیل شده است. ناحیه بزرگ‌تر به دلیل نویز حرارتی است که تأثیری شبیه مدولاسیون فرکانس دارد و بنابراین باندهای جانبی را تولید می‌کند که متناسب با عکس انحراف فرکانسی، کاهش می‌یابند. این باندهای جانبی در نمودار لگاریتمی نویز فاز، شیب -20 dB/dec را ایجاد می‌کنند. در انحراف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

یک حلقه قفل فاز به‌عنوان یک فیلتر پایین گذر برای نویز فاز مرجع کلاک ورودی و به‌عنوان یک فیلتر بالاگذر 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 به‌عنوان نویز فاز مرجع کلاک ورودی و $\phi_{in}(f)$ به‌عنوان نویز فاز نوسانگر کنترل شده با ولتاژ قفل شده، نویز فاز خروجی به‌صورت زیر خواهد بود:

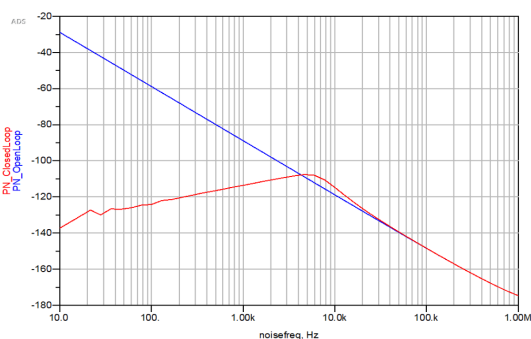
$$\Phi_{out}(f) = \frac{M}{\sqrt{1 + \frac{f}{F_{Loop}}}} \Phi_{in}(f) + \sqrt{1 + \frac{f}{F_{Loop}}} \Phi_{VCO}(f) \quad (1)$$

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 بالاگذر حلقه قفل فاز بسیار راحت است و به طور مؤثر عملکرد کلی نویز فاز را به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد.



شکل (۴). طرح‌واره حلقه قفل فاز شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار ADS
با در نظر گرفتن نویز فاز نوسانگر کنترل‌شده با ولتاژ.

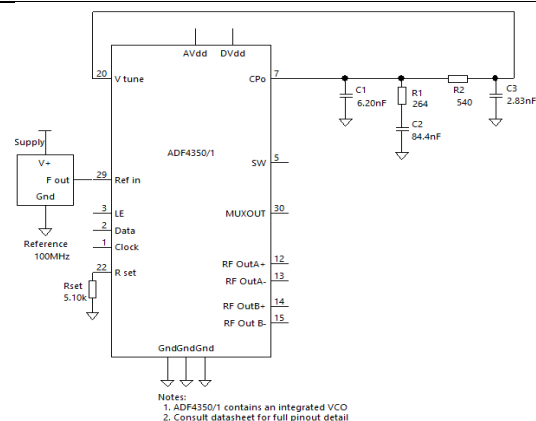


شکل (۵). نمودار نویز فاز نوسانگر کنترل‌شده با ولتاژ در دو حالت
حلقه باز و حلقه بسته.

نتایج این شبیه‌سازی که در نمودار شکل (۵) مشاهده می‌شود، نشان می‌دهد که نویز فاز VCO در حالت حلقه باز، در انحراف فرکانسی‌های پایین، بسیار بیشتر از حالتی است که در حلقه بسته قرار گرفته است. مطابق با این نمودار پیش‌بینی می‌شود نویز فاز حلقه در انحراف فرکانسی‌های بالا توسط نوسانگر کنترل‌شده با ولتاژ محدود شود.

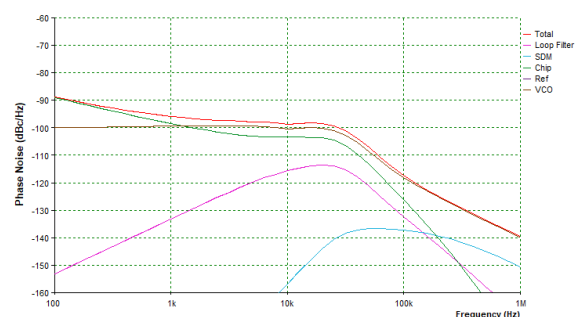
در ادامه سهم نویز فاز همه قطعات استفاده‌شده در حلقه قفل فاز به‌صورت تقریبی و با استفاده از داده برگ قطعه سنتزکننده فرکانس، وارد شبیه‌سازی‌شده که طرح‌واره آن مطابق با شکل (۶) است.

نتایج این شبیه‌سازی، در شکل (۷) نشان‌داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نویز فاز کلی حلقه قفل فاز در انحراف فرکانسی‌های پایین توسط نوسانگر مرجع و در انحراف فرکانسی‌های بالا توسط نوسانگر کنترل‌شده با ولتاژ محدود می‌شود.



شکل (۲). طرح‌واره مدار سنتزکننده فرکانس شبیه‌سازی‌شده در

نرم‌افزار ADIsimPLL.

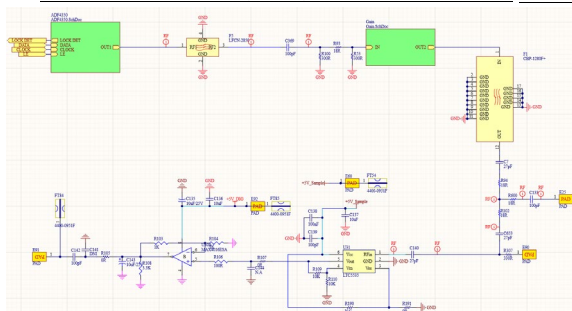


شکل (۳). نمودار نویز فاز سنتزکننده فرکانس ADF4350 در فرکانس
1GHz.

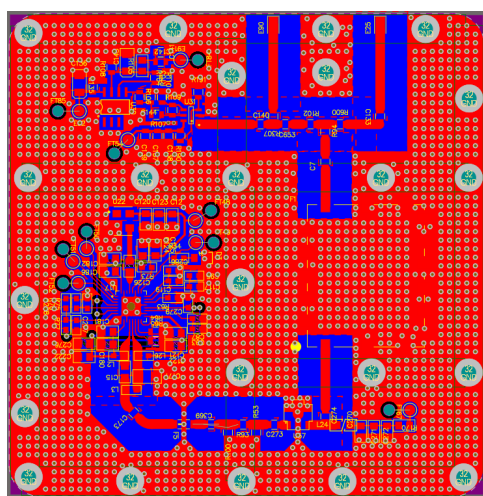
۳-۲ طراحی حلقه قفل فاز در نرم‌افزار ADS

برای پیاده‌سازی قطعه ADF4350 به‌صورت 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 تقسیم‌کننده‌های داخلی، می‌توان فرکانس‌های پایین‌تر را نیز در خروجی قطعه تولید کرد. کنترل قطعه و تنظیم فرکانس خروجی آن، با استفاده از سه خط کنترل دیجیتال انجام می‌شود.

به‌منظور تفسیر بهتر مدار، شبیه‌سازی حلقه قفل فاز در نرم‌افزار ADS انجام‌شده است. در ابتدا همان‌طور که در شکل (۴) نشان‌داده شده است، فقط نویز فاز نوسانگر کنترل‌شده با ولتاژ وارد شبیه‌سازی می‌شود. فرکانس خروجی مدار در این طراحی برابر با 1GHz در نظر گرفته شده است.

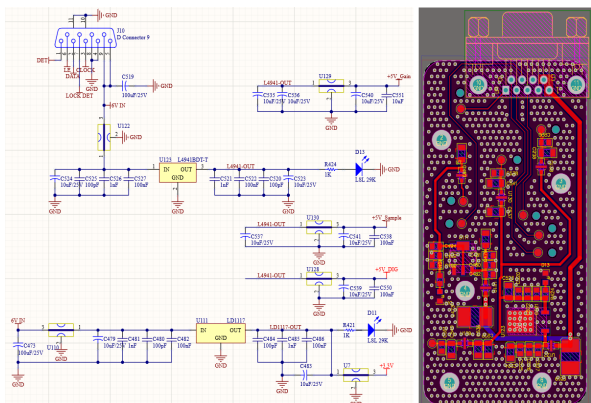


شکل (۸). طرح‌واره مدار سنتزکننده فرکانس طراحی شده.

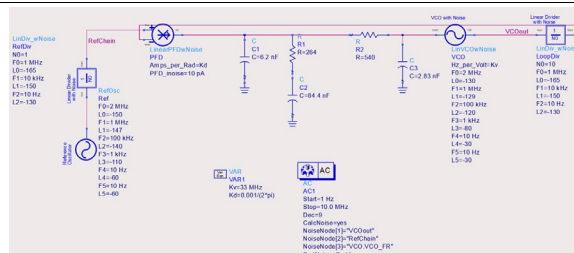


شکل (۹). پیاده‌سازی برد مدارچاپی سنتزکننده فرکانس طراحی شده.

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

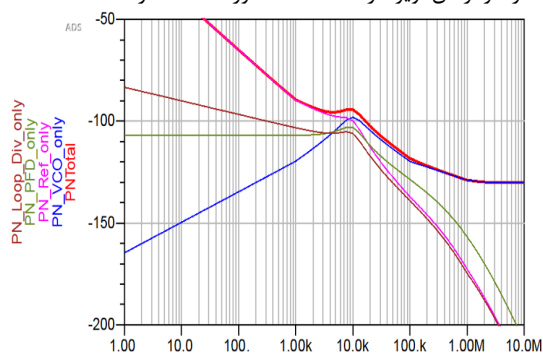


شکل (۱۰). طرح‌واره و برد مدارچاپی تغذیه.



شکل (۶). طرح‌واره حلقه قفل فاز شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار ADS

با در نظر گرفتن نویز فاز همه قطعات مورداستفاده در حلقه.



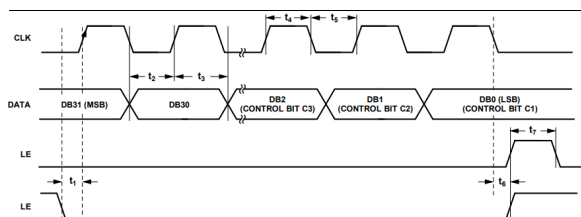
شکل (۷). سهم نویز فاز قطعات حلقه در نویز فاز کلی حلقه قفل فاز.

۳-۳ طراحی برد مدارچاپی سنتزکننده فرکانسی و برد تغذیه

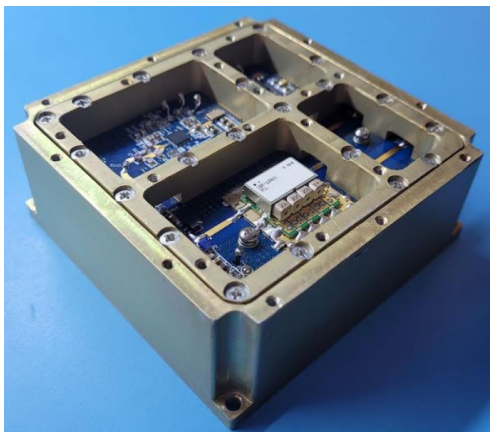
طرح‌واره مدار سنتزکننده فرکانس که در نرم‌افزار Altium Designer طراحی شده است، در شکل (۸) نشان‌داده شده است. برد مدارچاپی مربوط به این طرح‌واره نیز در شکل (۹) مشاهده می‌شود.

به‌منظور تأمین تغذیه سنتزکننده فرکانس و دیگر قطعات استفاده‌شده در این برد، یک برد تغذیه شامل رگولاتورهای L4941BDT و LD1117-3.3 نیز ساخته شده است. مدار برد تغذیه و برد مدارچاپی آن در شکل (۱۰) نشان‌داده 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.

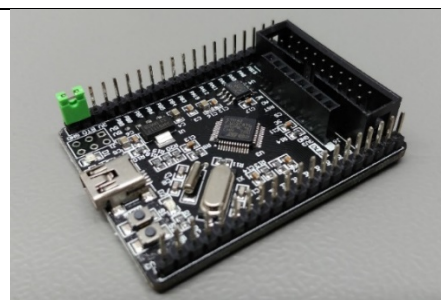
برای راه‌اندازی قطعه سنتزکننده فرکانس، همان‌طور که در داده برگ آن ذکر شده است، داده‌های رجیسترها به‌وسیله ارتباط سریال به قطعه ارسال می‌شود. این ارتباط از طریق پایه‌های LE، DATA، CLK، برای ارتباط با قطعه به‌منظور تنظیم فرکانس و دیگر مشخصات، از میکروکنترلر STM32F103C8T6 استفاده شده است که برد آموزشی آن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



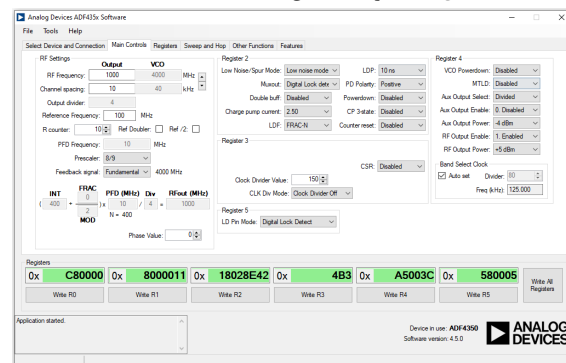
شکل (۱۳). نمودار زمان بندی انتقال دیتا به قطعه سنتز کننده فرکانس از طریق ارتباط SPI.



شکل (۱۴). پیاده سازی واحد سنتز کننده فرکانس.



شکل (۱۱). برد دیجیتال STM32F103C8T6.



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

۴-۱ اندازه گیری نویز فاز سیگنال خروجی سنتز کننده فرکانس

به منظور بررسی مقادیر نویز فاز خروجی این سنتز کننده فرکانس، از دستگاه اندازه گیری Spectrum Analyzer استفاده شده است. چیدمان اندازه گیری مطابق با شکل (۱۵) است. ولتاژ اعمالی به واحد سنتز کننده فرکانس، V_6 و جریان کشی آن در حدود 300 mA است.

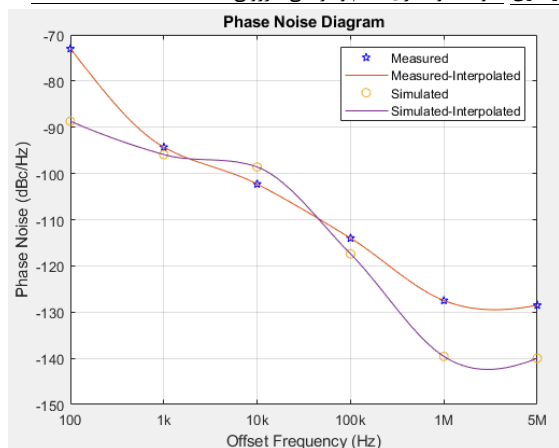
سیگنال خروجی از واحد سنتز کننده فرکانس در انحراف فرکانسی های مختلف توسط دستگاه تحلیل گر طیف اندازه گیری شده است. نتایج به صورت نشان داده شده در شکل (۱۶) است. برای محاسبه مقدار نویز از روی مقادیر اندازه گیری شده کافی است اختلاف توان حامل و نویز در انحراف فرکانسی مورد نظر محاسبه شده و با مقدار $10 \log RBW$ در آن اندازه گیری 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 اندازه گیری است که دقت فرکانس را تغییر می دهد.

مطابق با اندازه گیری های انجام شده، نویز فاز سیگنال خروجی در انحراف فرکانسی های 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.

پس از تعیین مقدار رجیسترها، باید مطابق با آنچه در داده برگ قطعه بیان شده است، این مقادیر به قطعه ارسال شوند. برای نوشتن مقادیر رجیسترها روی قطعه، یک رابط سریال ساده سازگار با SPI تعبیه شده است. در این ارتباط سریال، قطعه سنتز کننده فرکانس به عنوان slave و برد دیجیتال مذکور به عنوان master به کار گرفته می شوند. این ارتباط در حالتی که پین CE در سنتز کننده فرکانس در وضعیت یک منطقی باشد، از طریق سه خط CLK، DATA و LE برقرار خواهد شد. به این صورت که خط LE را در وضعیت صفر منطقی قرار داده و با ارسال کلاک روی خط CLK، دیتایی که روی خط DATA قرار می گیرد، متناسب با ترتیب ذکر شده در داده برگ و مطابق با شکل (۱۳) در داخل قطعه پیکربندی می شود. در نهایت متناسب با مقادیر رجیسترهای اعمال شده، فرکانس سیگنال خروجی و دیگر پارامترهای آن تنظیم خواهد شد.

۴-۲ ساخت سنتز کننده فرکانسی و بررسی نتایج نویز فاز خروجی آن

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



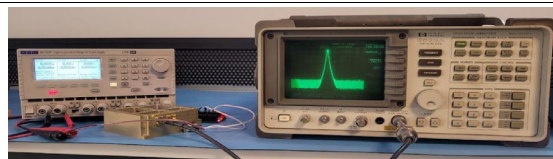
شکل (۱۷). مقایسه نویز فاز اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده.

۵- نتیجه‌گیری

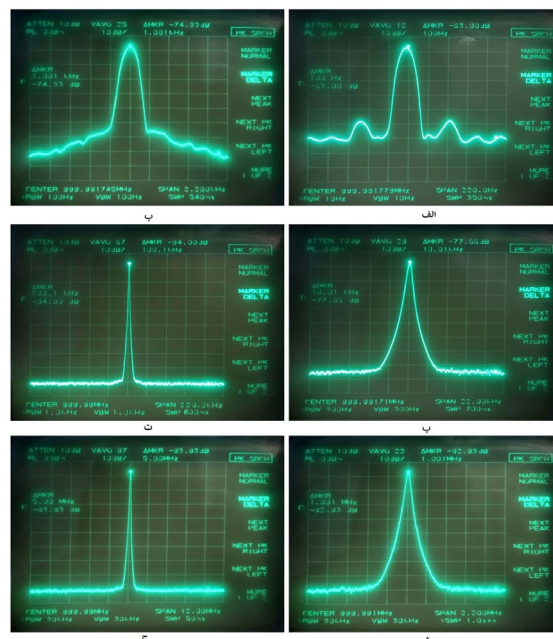
در این مقاله، یک قطعه سنتزکننده فرکانس مبتنی بر حلقه قفل فاز طراحی و پیاده‌سازی شد. فیلتر حلقه این قطعه که با نام تجاری ADF4350 شناخته می‌شود، برای قفل شدن در فرکانس 1GHz طراحی گردید. به منظور بررسی دقیق‌تر نویز فاز، مدار حلقه قفل فاز در نرم‌افزار ADS نیز شبیه‌سازی شد. در نهایت برد سنتزکننده فرکانس به همراه برد تغذیه ساخته شده و نویز فاز سیگنال خروجی 1GHz اندازه‌گیری شد. مقدار نویز فاز سیگنال خروجی سنتزکننده فرکانس، در انحراف فرکانسی‌های پایین، در محدوده 100Hz تا 1MHz، مطابق با مقادیر موردانتظار است که مقدار مناسبی برای استفاده در سخت‌افزارهای راداری متداول است. متناسب با کاربرد رادار مورد استفاده، محدوده مقادیر نویز فاز در انحراف فرکانسی‌های بالا و پایین، می‌تواند تعیین شود و در نتیجه قطعه سنتزکننده مناسب آن مورد استفاده 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.



شکل (۱۵). چیدمان اندازه‌گیری نویز فاز خروجی واحد سنتزکننده فرکانس.



شکل (۱۶). نتایج اندازه‌گیری نویز فاز سیگنال خروجی واحد

سنتزکننده فرکانس ساخته شده در انحراف فرکانسی؛ الف، 100Hz؛ ب، 1kHz؛ پ، 10kHz؛ ت، 100kHz؛ ث، 1MHz؛ ج، 5MHz. نقاط مشخص شده در شکل معادل با مقادیر اندازه‌گیری شده و خط ترسیم شده، نمودار نویز فاز حاصل از درون‌یابی همین نقاط است.

همان‌طور که از نتایج مشخص است، در انحراف فرکانسی‌های بیشتر از 1MHz مقدار نویز فاز محاسبه شده در حدود -128 dBc/Hz است که این موضوع به دلیل محدودیت‌های اندازه‌گیری ایجاد شده توسط دستگاه تحلیل گر طیف است. لازم به ذکر است که مقادیر انحراف فرکانسی برای اندازه‌گیری 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 اندازه‌گیری 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