

طراحی و شبیه‌سازی زیرسامانه کنترل حلقه بسته فرستنده سوئیچینگ در موقعیت یاب محلی لورن

احمد عفیفی^۱، اباذر خرمی^{۲*} و مهسا حیدری^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۲۱

چکیده

برای پیاده‌سازی زیرسامانه کنترل حلقه بسته فرستنده سامانه لورن دو بخش مجزا برای فاز و پوش مورد نیاز است تا در صورت تغییرات ناخواسته آنتن، پارامترهای جریان عبوری از شرایط قابل قبول خارج نشود. ایده اصلی، هم‌فاز کردن جریان و ولتاژ با افزودن یک سلف متغیر سری شده با آنتن است تا امپدانس آنتن در فرکانس 100kHz به گونه‌ای تنظیم شود که قسمت موهومی امپدانس دیده شده در ورودی آنتن صفر شود، آنتن همانند یک امپدانس مقاومتی رفتار کند و ولتاژ با جریان هم‌فاز گردند. برای این منظور در کنترل‌کننده فاز از مداری برای تعیین اختلاف فاز و کنترل‌کننده تناسبی استفاده شده است. در بخش کنترل پوش نیز با اعمال یک پالس تکی و تحلیل جریان عبوری از مدار، مقادیر معادل آنتن را به دست آورده و دامنه پالس ورودی بر مبنای این مقادیر محاسبه شده است. بر اساس اندازه‌گیری‌ها و محاسبات به عمل آمده، برای حالت‌های مختلف با تغییر در محدوده ده درصد از مقادیر معادل آنتن، کنترل‌کننده عملکرد مناسبی دارد. به عنوان نمونه حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌دوره دوم تا دوازدهم $3/49\text{ns}$ و همچنین MMSE و حداکثر خطای نقاط اوج در ۸ نیم‌دوره نخست به ترتیب $0/01875$ و $0/02657$ است که با استانداردهای مورد نیاز پالس لورن مطابقت دارد.

واژگان کلیدی: موقعیت‌یاب زمین‌پایه محلی، کنترل‌کننده فاز، لورن، حلقه بسته، سلف متغیر.

^۱ دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، afifi@mut.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، دکتری، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، دانشکده و پژوهشکده سایبرالکترونیک، abazar.khorrami@gmail.com

^۳ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، 135heidari@gmail.com

۱. مقدمه

موقعیت‌یابی یکی از ارکان سامانه های پدافندی و فرماندهی و کنترل می‌باشد [۱]. برای این کار از راه‌کارهای مهمی مانند بکارگیری تأخیر زمان در دریافت امواج رادیویی استفاده می‌شود. فرستنده‌های این امواج به‌صورت زمین‌پایه یا فضاپایه هستند. شناخته‌شده‌ترین روش موقعیت‌یابی فضاپایه، استفاده از سامانه موقعیت‌یابی جهانی^۱ است که با توجه به امکان ناکارآمدی آن در شرایط خاص و بحرانی، کشورهای مختلف از سامانه‌های زمین‌پایه به‌عنوان پشتیبان آن‌ها استفاده می‌کنند. سامانه‌های مذکور برخلاف سامانه‌های ماهواره‌ای از فرستنده‌های ثابت مستقر در سطح زمین بهره می‌گیرند [۲-۵].

خدمات و کاربردهای GPS مستعد ابتلا به انواع مختلفی از تداخل است و اثرات این آسیب‌پذیری در کاربردهای حمل‌ونقل غیرنظامی باید مورد مطالعه قرار گیرد. بنابراین GPS به‌عنوان سامانه یکتا در ناوبری مورد تأیید نیست و یک نسخه پشتیبان برای تمام کاربردهایی که دارای پتانسیل ایجاد موقعیت‌های تهدیدکننده زندگی یا لطمه‌های عمده اقتصادی و محیطی هستند مورد نیاز است [۶-۸]. به‌عنوان نمونه سیگنال‌های GPS که توسط بیش از ۲۰ ماهواره مستقر در ۲۰,۰۰۰ کیلومتری سطح زمین ارسال می‌شوند بسیار ضعیف هستند و یک مختل‌کننده^۲ یک وات - که به‌سادگی در دسترس است - می‌تواند استفاده غیرنظامی از GPS را در یک منطقه شهری بزرگ مختل کند. همچنین نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری GPS در اتحادیه اروپا نشان می‌دهد که تنها کمتر از ۴۰ کاربرد از ۱۳۷ کاربرد مورد بررسی GPS پس از مختل شدن قابل استفاده است [۹].

پس از GPS سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای^۳ جدیدی مانند گالیله مطرح شده‌اند. هر چند استفاده از آن‌ها مشکل استقرار مرکز کنترل GPS در ایالات متحده آمریکا و مسدود شدن عمدی سیگنال را برطرف می‌کند ولی برای همه آن‌ها امکان وقفه در ارائه خدمات به دلیل تداخل عمدی یا غیرعمدی وجود دارد.

بر این اساس نیاز به یک سامانه پشتیبان با حالت‌های خرابی و تهدیدات متفاوت به طور کامل درک شده است [۱۰]. به‌عنوان مثال سامانه مرجع اینرسی^۴ یک نمونه مناسب از عدم تشابه با ناوبری ماهواره‌ای است. این سامانه، شتاب خطی و سرعت زاویه‌ای را در سه بُعد اندازه‌گیری می‌کند و کاربر با توجه به موقعیت شروع و جهت‌گیری، می‌تواند جابه‌جایی خود را با دو بار انتگرال‌گیری از شتاب محاسبه کند. با این حال، سامانه مذکور یک راه‌حل مناسب برای قطع طولانی‌مدت GNSS نیست چراکه نمی‌تواند بدون داشتن یک موقعیت و جهت اولیه شروع به کار کند [۹-۱۰].

یک نسخه پشتیبان مستقل از GNSS مورد نیاز است که بتواند مقدار مطلق موقعیت و زمان^۵ را به دست آورد و قادر به برقراری ارتباط در زمان قطع طولانی باشد. به‌گونه‌ای که بتواند در کاربردهای مختلف و متنوع قابل استفاده باشد. پشتیبان پیشنهاد شده توسط مطالعات مرکز بین‌المللی حمل‌ونقل آمریکا^۶ و برنامه ناوبری رادیویی اروپا^۷، به‌روزرسانی و ارتقاء سامانه ناوبری رادیویی لورن است [۱۰].

لورن یک سامانه ناوبری رادیویی دارای برد بلند زمین‌پایه است [۱۱]. گیرنده آن موقعیت کاربر را با محاسبه اختلاف زمانی دریافت سیگنال‌ها از حداقل دو ایستگاه فرستنده به دست می‌آورد. این سامانه علاوه بر اینکه می‌تواند پشتیبان مناسبی برای سامانه‌های موقعیت‌یاب ماهواره‌ای در زمان اختلالات عمدی یا ناخواسته باشد امکان بهره‌گیری هم‌زمان و توأم با آن‌ها را دارد که در این صورت قابلیت‌های هر یک را نسبت به سامانه یکتا ارتقا می‌دهد [۱۰]. این سامانه برای نخستین بار در سال ۱۹۵۸ عملیاتی شد و در چند سال اخیر پس از چند مرحله بهبود و به‌روزرسانی تحت عنوان «لورن بهبودیافته»^۸ با به‌کارگیری فن‌آوری‌های جدید مطرح گردید و عملکرد آن نسبت به نسخه‌های قبلی به میزان قابل توجهی ارتقاء یافته به‌گونه‌ای که بر اساس گزارش اداره نظارت

⁴ IRS: Inertial Reference System

⁵ PVT: Position, Velocity and Time

⁶ Volpe National Transportation Systems Center

⁷ ERNP: European Radio Navigation Plan

⁸ e-Loran: enhanced Long-Range Navigation

¹ GPS: Global Positioning System

² Jammer

³ GNSS: Global Navigation Satellite System

مدولاسیون دامنه^۳ و مدولاسیون عرض پالس^۴ محقق می‌شود که نویسندگان این مقاله و همکارانشان نمونه‌هایی از مولد پالس لورن مبتنی بر مدولاسیون دامنه و عرض پالس را طراحی و پیاده‌سازی کرده‌اند [۲۲-۲۴].

مبنای طراحی و پیاده‌سازی این روش‌ها وجود یک آنتن با امپدانس مشخص است. برای تأمین جریان، ولتاژ موردنظر توسط بلوک‌های تقویت‌کننده تولید می‌شود [۲۳]. بنابراین با توجه به امکان تغییر المان‌های آنتن به دلیل شرایط محیطی، در صورت طراحی حلقه باز سامانه جریان عبوری با تغییر بار به ازای یک ولتاژ ثابت و معین تغییر خواهد کرد و ممکن است از حد استاندارد‌های موردنیاز سیگنال لورن خارج شود.

در بخش دوم مقاله به استانداردهای پالس لورن پرداخته می‌شود. در بخش سوم پس از طراحی یک سلف متغیر، سامانه حلقه بسته هم‌فاز مدنظر به‌عنوان یک نوآوری تبیین و تشریح خواهد شد. این سامانه به‌صورت خودکار مقادیر معادل آنتن را محاسبه کرده و با توجه به جریان لورن، ولتاژ موردنیاز را بر مبنای پارامترهای لحظه‌ای آنتن تولید می‌کند. پس‌از آن و در بخش چهارم چگونگی تولید سیگنال لورن با ارائه مدل ریاضی و شبیه‌سازی در تقویت‌کننده سوئیچینگ مبتنی بر مدولاسیون دامنه بیان می‌شود و در بخش پایانی مقاله پس از گزارش نتایج، تحلیل آن‌ها ارائه می‌گردد.

۲. استانداردهای سیگنال لورن

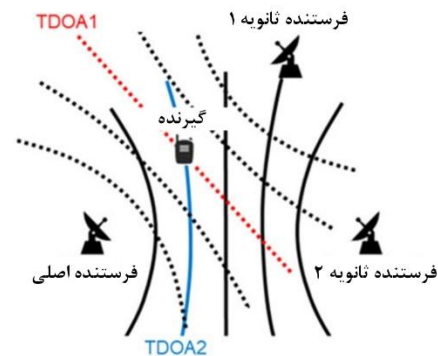
شکل در نظر گرفته شده برای سیگنال لورن به صورتی است که توانایی برآورده کردن نیازمندی‌های این سامانه را دارد. این سیگنال از رفتار زمانی خاص، دقیق و توان مناسبی برخوردار است به‌گونه‌ای که می‌توان در فواصل دور با خطای پائین آن را آشکار کرد. رابطه مربوط به سیگنال لورن نرمالیزه به‌صورت زیر است [۲۵-۲۶].

$$i(t) = e^2 \times \left(\frac{t-\tau}{65 \times 10^{-6}} \right)^2 e^{-\frac{2(t-\tau)}{65 \times 10^{-6}}} \quad (1)$$

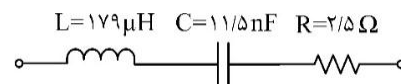
در رابطه اخیر^۲ ضریب نرمالیزاسیون نپری است و به‌گونه‌ای تعیین گردیده که حداکثر دامنه جریان لورن برابر با

هوانوردی فدرال^۱ به‌عنوان پشتیبان GPS در کاربردهای حمل‌ونقل تأیید شده است [۱۰]. این موضوع دلایل متعددی دارد. به‌عنوان نمونه به علت فرکانس کار پایین، انتشار امواج ارسالی در سطح زمین می‌باشد. از طرف دیگر سیگنال ارسالی از فرستنده بسیار پُر توان هستند و برخلاف GPS به داخل شهرها، ساختمان‌ها، شاخ و برگ درخت‌ها و مناطقی که موانع طبیعی زیادی دارند نفوذ می‌کند [۲۰-۱۲]. بنابراین اختلال سیگنال‌های لورن به دو دلیل بیان شده مشکل است.

سامانه لورن شامل ایستگاه‌های فرستنده (آنتن، تقویت‌کننده و ژنراتور)، ایستگاه‌های کنترل، سایت‌های پایش منطقه‌ای، تجهیزات مربوط به هم‌زمان کردن فرستنده‌ها و گیرنده‌هایی است که در اختیار کاربران قرار گرفته و متناسب با کاربردها و میزان دسترسی‌های متفاوت طراحی شده‌اند [۱۱]. شکل ۱ شمای کلی از سامانه لورن را نشان می‌دهد. در این شکل امپدانس آنتن فرستنده با یک بار RLC^۲ سری با $R = 2/5 \Omega$ ، $C = 11/5 nF$ و $L = 179 \mu H$ قابل مدل‌کردن است [۲۱]. شکل ۲ مدار معادل آنتن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. شمای کلی از سامانه لورن [۱۱]



شکل ۲. مدار معادل آنتن [۲۱]

یکی از مواردی که در e-Loram ارتقا پیدا کرده تغییر در توپولوژی ساخت فرستنده است. امروزه این کار به روش‌های مختلفی با به‌کارگیری تقویت‌کننده‌های سوئیچینگ کلاس D با

³ Amplitude Modulation

⁴ PWM: Pulse Width Modulation

¹ FAA: Federal Aviation Administration

² Resistive-Inductive-Capacitive Load

به منظور کنترل لبه پیشرو پالس لازم است تا حداکثر خطای ECD و خطای هر یک از نقاط اوج به طور توأمان برقرار باشند.

ج- زمان‌های عبور از صفر لبه پیشرو پالس و میزان خطای آن‌ها: با توجه به دسته‌بندی لبه‌های پیشرو پالس و بسته به مقدار

خطای ECD نوسان مجاز خطای نقاط عبور از صفر لبه‌های پیشرو برای یک پالس استاندارد لورن (با فرکانس 100 kHz و به ازای ECD برابر با صفر) در جدول (1) نشان داده شده است. مطابق با این جدول نقطه عبور از صفر استاندارد 30 μsec است و این بدان معنی می‌باشد که پالس از لحظه 25 μsec - شروع می‌شود.

جدول 1. نوسان مجاز خطای زمان‌های عبور از صفر [28]

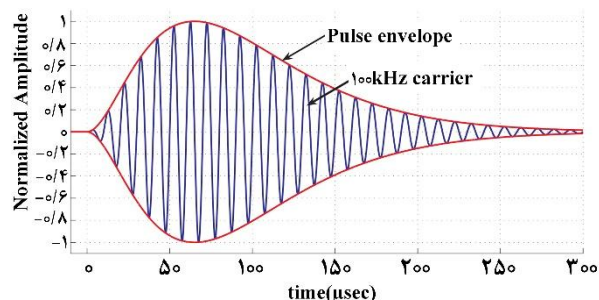
نوسان مجاز خطا (ns)	زمان (μs)	زمان عبور از صفر استاندارد (μs)
±1000	-25	5
±100	-20	10
±75	-15	15
±50	-10	20
±50	-5	25
-	عبور از صفر استاندارد	30
±50	5	35
	10	40
	15	45
	20	50
	25	55
	30	60

د- چنانچه دامنه بیشینه با A نشان داده شود- که در حالت نرمالیزه برابر با یک است- باید دامنه در 50 μsec پس از شروع سیگنال، نسبت به دامنه بیشینه کمتر از 0.16A باشد. ه- پهنای باند سیگنال 5 kHz است و انرژی آن در خارج از محدوده 90-110 kHz کمتر از 1٪ کل انرژی تشعشی است به گونه‌ای که در هر سو نباید بیشتر از 5٪ این مقدار باشد.

3. طراحی کنترل کننده

در سامانه پیشنهادی دو حلقه کنترل کننده مورد نیاز است. حلقه نخست برای هم‌فاز کردن ولتاژ ورودی و جریان آنتن و

واحد باشد. همچنین π بیانگر تفاضل پوش به دوره در هشت نیم‌دوره نخست¹ و PC پارامتر کُدگذاری فاز می‌باشد که در حالت مثبت برابر با صفر و در حالت منفی برابر با π است. همان‌گونه که از این رابطه پیداست، تابع دامنه با یک موج سینوسی 100 kHz مدوله شده است. سیگنال لورن نرمالیزه ایده‌آل در شکل 3 نشان داده شده است.



شکل 3. سیگنال لورن نرمالیزه ایده‌آل [10 و 24-22]

سیگنال لورن به دو بخش تقسیم می‌شود و برای هر یک از این قسمت‌ها قیودی در نظر گرفته شده است. بخش نخست «لبه‌های پیشرو» شامل محدوده زمانی از صفر تا بیشینه دامنه سیگنال (65 μsec نخست) و بخش دوم «لبه‌های پسرو» است که از نقطه اوج دامنه سیگنال تا زمان افت کامل آن (از 65 μsec تا زمان افت کامل سیگنال در 250 μsec یعنی 185 μsec بعد) را شامل می‌شود. پارامترهای استاندارد برای سیگنال لورن ارسالی از فرستنده شامل موارد زیر است [27]:

الف- ECD: مقدار مجاز این پارامتر $\pm 2/5 \mu\text{sec}$ است که این شرط بر مبنای خطای جذر میانگین مربعات³ به صورت رابطه (3) بیان می‌شود. در این رابطه I_n بیان‌گر دامنه سیگنال ایده‌آل و S_n بیان‌گر دامنه سیگنال به دست آمده است.

$$MMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (I_n - S_n)^2}{N}} \leq 0.1 \quad (2)$$

ب- خطای نقاط اوج: هر یک از نقاط اوج در 13 نیم‌دوره نخست باید در روابط (3) و (4) صدق کند.

$$|I_N - S_N| \leq 0.3 \quad ; \quad 1 \leq N \leq 8 \quad (3)$$

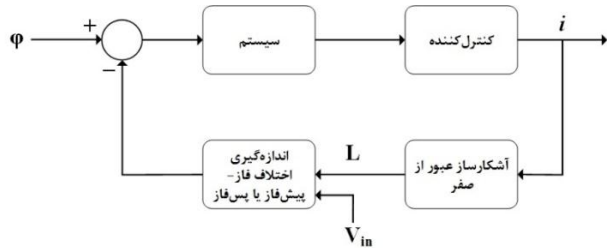
$$|I_N - S_N| \leq 0.1 \quad ; \quad 9 \leq N \leq 13 \quad (4)$$

¹ ECD: Envelope-to-Cycle Difference

² PC: Phase Code

³ MMSE: Minimum Mean Square Error

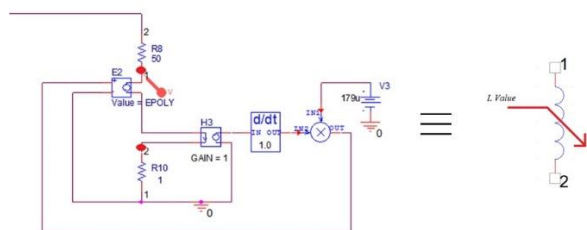
حلقه دوم برای ایجاد جریانی مطابق با معادله جریان لورن است. برای هم‌فاز کردن یک سلف متغیر به صورت سری با آنتن اضافه می‌شود تا در فرکانس 100kHz (فرکانس رزونانس) به گونه‌ای تغییر کند که قسمت موهومی امپدانس دیده شده در ورودی آنتن صفر شود. بنابراین آنتن همانند یک امپدانس مقاومتی رفتار می‌کند و ولتاژ با جریان هم‌فاز خواهد شد. در حلقه دوم نیز یک پالس اعمال خواهد شد و با نمونه‌برداری از جریان خروجی، دامنه مورد نیاز برای ایجاد پالس لورن استاندارد محاسبه می‌گردد.



شکل ۵. حلقه کنترل‌کننده هم‌فاز کردن جریان آنتن و ولتاژ ورودی

۳-۱. سلف متغیر با ولتاژ

همان‌گونه که بیان شد، در مدار کنترل‌کننده نیاز به یک سلف متغیر با ولتاژ است. از آنجایی که این المان در نرم‌افزار OrCAD وجود ندارد، با استفاده از المان‌های مداری طراحی می‌گردد (شکل ۶). عملکرد مدار به این صورت است که از جریان ورودی گره ۱ توسط یک منبع ولتاژ وابسته به جریان نمونه‌برداری شده و پس از مشتق‌گیری در ولتاژ ورودی - که بیان‌گر مقدار سلف است - ضرب و در نهایت توسط یک منبع وابسته به ولتاژ، ولتاژ دو سر سلف ایجاد می‌گردد. بر این اساس بر مبنای رابطه $V_L = L di / dt$ سلف متغیر ایجاد خواهد شد.

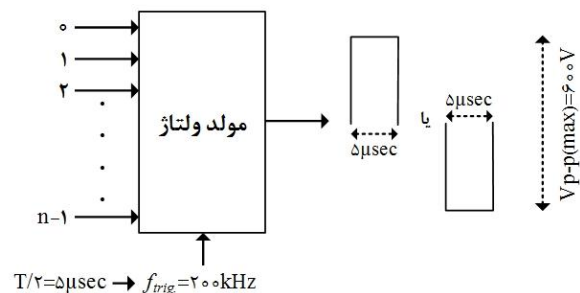


شکل ۶. مدار معادل سلف متغیر با ولتاژ

۳-۲. آشکارکننده اختلاف فاز

گام بعدی طراحی مداری است که بتواند اختلاف فاز جریان و ولتاژ را با دقت خوبی اندازه‌گیری نماید. این مدار باید به گونه‌ای عمل کند که مقدار پس‌فاز و یا پیش‌فاز بودن سیگنال جریان نسبت به ولتاژ ورودی با خروجی مثبت و منفی

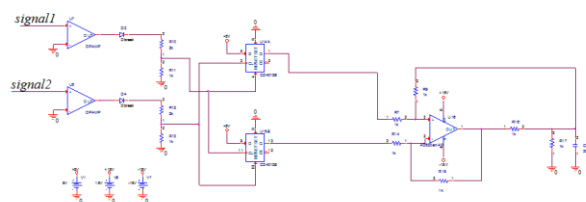
سیگنال لورن توسط یک منبع مربعی متناوب با دامنه متغیر و فرکانس ثابت 100kHz ساخته می‌شود به طوری که جریان عبوری از آنتن استانداردهای جریان لورن را تامین کند و نقاط عبور از صفر آن هم‌فاز با منبع ورودی باشد. منبع تحریک ورودی باید به گونه‌ای طراحی شود که به محض تحریک توسط یک عدد چندبیتی که هر $5\mu\text{s}$ به آن اعمال می‌شود، یک پالس با دامنه متناسب با عدد ورودی ایجاد نماید. یعنی در هر $5\mu\text{s}$ یک پالس با دامنه مثبت یا منفی متناسب با عدد ورودی تولید شود. ولتاژ پیک-پیک این منبع هم به صورت فرضی 60V در نظر گرفته شده است. بلوک دیاگرام عملکردی منبع تحریک آنتن در شکل ۴ آمده است. ولتاژ تولید شده به آنتن اعمال می‌گردد و باید به نحوی کنترل شود که جریان عبوری از آنتن، هم‌فاز با ولتاژ و مطابق با رابطه سیگنال لورن باشد.



شکل ۴. بلوک دیاگرام منبع تحریک مدار آنتن

در گام نخست، عملکرد پس‌فاز بودن و یا پیش‌فاز بودن جریان نسبت به ولتاژ مربعی ورودی تعیین می‌شود. حلقه کنترل‌کننده این بخش در شکل ۵ آمده است. در این سامانه از جریان نمونه‌برداری شده و با محاسبه لحظه‌های عبور از صفر،

بر اساس توضیحات داده شده مدار طراحی گردید که در صورت مشاهده سیگنال پالس در خروجی، بیانگر پس فاز بودن سیگنال دوم از سیگنال مرجع با مقدار زمانی عرض پالس است و در صورت پیش فاز بودن آن هیچ سیگنالی در خروجی تولید نمی شود و در سطح صفر منطقی باقی می ماند. اگر از همین ایده به صورت دوتایی استفاده شود و همانند آنچه در شکل ۸ نشان داده شده فلیپ فلاپ دیگری به صورت موازی با فلیپ فلاپ اول قرار گیرد که نحوه اعمال سیگنال به پایه های آن عکس حالت نخست باشد، مداری با دو خروجی وجود دارد که یکی بیانگر پس فاز بودن و دیگری بیانگر پیش فاز بودن سیگنال ورودی از سیگنال مرجع است. در قسمت نخست این مدار بخش تولید سیگنال متناسب با استاندارد دیجیتال، در بخش دوم تشخیص دهنده پس فاز و یا پیش فاز و در بخش سوم مبدل ولتاژ تفاضلی برای ایجاد ولتاژی آنالوگ و علامت دار طراحی شده است.



شکل ۸. تشخیص دهنده سیگنال پس فاز و پیش فاز

۳-۳. مدار کنترل کننده فاز

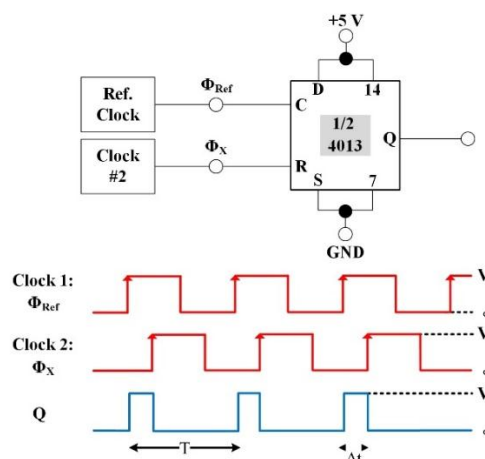
برای به حداقل رساندن اختلاف فاز از کنترل کننده تناسبی نشان داده شده در شکل ۹ استفاده می شود. عملکرد آن بدین صورت است که ابتدا ولتاژ ورودی و جریان عبوری از سلف متغیر نمونه برداری شده و به مدار آشکارکننده اختلاف فاز وارد می گردد. سپس حاصل اختلاف فاز محاسبه شده وارد کنترل کننده تناسبی می شود که این قسمت تعیین کننده ولتاژ ورودی برای مشخص کردن مقدار سلف متغیر است. به این ترتیب حلقه بسته خواهد شد.

نتایج حاصل از شبیه سازی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل نمودار آبی مقدار ولتاژ اعمالی به سلف متغیر را نشان می دهد. این ولتاژ متناظر با مقدار سلف سری شده با مدار می باشد. همانطور که مشاهده می شود این سلف مقداری در حدود $40\mu\text{H}$ دارد که با دقت خوبی ولتاژ و جریان

را نشان دهد به طوری که خروجی مثبت بیانگر پس فاز بودن و خروجی منفی بیانگر پیش فاز بودن جریان از ولتاژ باشد. همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده با استفاده از یک فلیپ فلاپ نوع D می توان این مدار را طراحی کرد. ورودی فلیپ فلاپ همواره در سطح یک منطقی قرار دارد. سیگنال کلاک مرجع به ورودی کلاک فلیپ فلاپ و سیگنال کلاک دوم به ورودی بازنشانی^۱ آن متصل می شود. از آنجایی که بازنشانی نسبت به کلاک اولویت دارد به محض اعمال سیگنال به آن، خروجی فلیپ فلاپ صفر می شود. در بررسی عملکرد مدار دو حالت متصور است:

حالت نخست: سیگنال کلاک زودتر از بازنشانی وارد مدار شود. در این صورت خروجی یک شده و تا لحظه اعمال بازنشانی یک می ماند. به محض اعمال بازنشانی خروجی صفر خواهد شد. بنابراین در خروجی یک پالس با عرض متناسب با اختلاف زمانی دو سیگنال مشاهده می شود. بر این اساس در صورت پس فاز بودن سیگنال دوم، یک پالس در خروجی ایجاد می گردد.

حالت دوم: سیگنال بازنشانی زودتر وارد مدار شود. در این صورت با توجه به اولویت بالاتر بازنشانی، خروجی همواره در صفر منطقی باقی می ماند و در خروجی پالسی مشاهده نخواهد شد. بنابراین در صورت پیش فاز بودن سیگنال دوم، هیچ پالسی در خروجی تولید نمی شود.



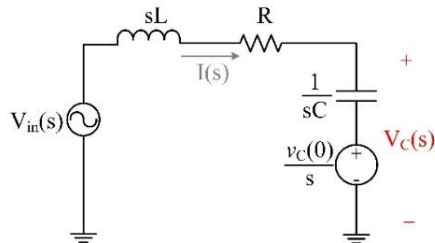
شکل ۷. تشخیص دهنده سیگنال پس فاز

^۱ Reset

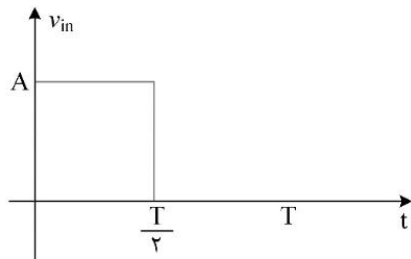
$$v_{in}(t) = Au(t) - Au(t - \frac{T}{\gamma}) \xleftrightarrow{\text{LAPLAS}} V_{in}(s) = \frac{A}{s} (1 - e^{-\frac{T}{\gamma}s}) \quad (5)$$

از طرف دیگر:

$$I(s) = \frac{V_{in}(s) - \frac{v_C(\cdot)}{s}}{R + sL + \frac{1}{sC}} \quad (6)$$



شکل ۱۲. مدار معادل آنتن



شکل ۱۳. ولتاژ اعمال شده به بار در یک نیم دوره

با جایگذاری رابطه ۵ در رابطه ۶ و چند مرحله ساده‌سازی،

جریان به شکل زیر قابل بیان است:

$$I(s) = \frac{A - v_C(\cdot) - Ae^{-\frac{T}{\gamma}s}}{L[(s + \frac{R}{\gamma L})^\alpha + (\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2})^\beta]} \quad (7)$$

بر اساس رابطه اخیر و به کمک روابط عکس تبدیل فوریه،

رابطه جریان در حوزه زمان استخراج می‌شود:

$$i(t) = K[A - v_C(\cdot)]e^{-\alpha t} \sin \beta t u(t) - KAe^{-\alpha(t - \frac{T}{\gamma})} \sin \beta(t - \frac{T}{\gamma}) u(t - \frac{T}{\gamma}) \quad (8)$$

که در رابطه اخیر $K = \frac{1}{\beta L}$ است.

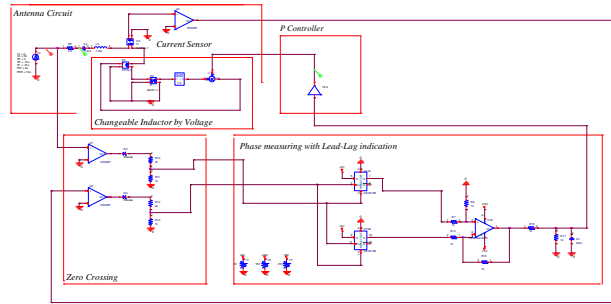
همچنین با فرض ولتاژ اولیه $v_C(\cdot)$ برای خازن، با چند

مرحله ساده‌سازی رابطه زیر به دست می‌آید.

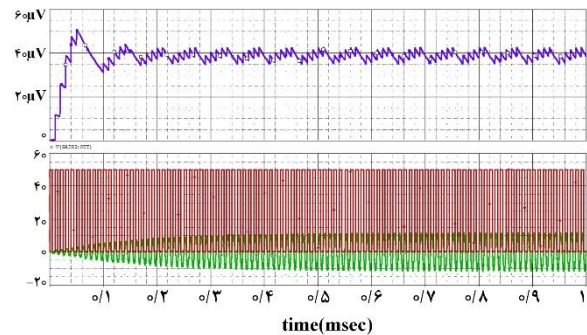
$$v_C(t) = A \left[v_1(t) u(t) - v_1(t - \frac{T}{\gamma}) u(t - \frac{T}{\gamma}) \right] + v_C(\cdot) [1 - v_1(t)] u(t) \quad (9)$$

که:

را با یکدیگر هم‌فاز می‌کند. شکل ۱۱ موج شبیه‌سازی شده را با بزرگنمایی بیشتر نشان می‌دهد.

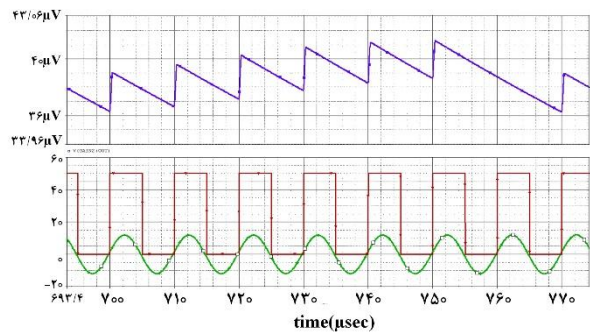


شکل ۹. حلقه کنترل فاز



شکل ۱۰. نتایج شبیه‌سازی حلقه کنترل فاز

آبی: ولتاژ اعمالی به سلف متغیر - قرمز: ولتاژ مربعی اعمالی به آنتن
سبز: جریان عبوری از آنتن



شکل ۱۱. بزرگنمایی نتایج شبیه‌سازی حلقه کنترل فاز

۴. استخراج دامنه پالس

برای شبیه‌سازی اثر کنترل‌کننده بر سامانه لورن حلقه بسته لازم است ولتاژ مورد نیاز برای اعمال به آنتن استخراج گردد.

چنانچه دامنه پالس در هر نیم‌دوره متغیر باشد، بر اساس شکل ۱۲ و با در نظر گرفتن نیم‌پالس نخست مطابق با شکل ۱۳ می‌توان رابطه جریان عبوری از مدار را به دست آورد.

برای مدار داده شده رابطه ولتاژ و تبدیل لاپلاس آن

به صورت زیر محاسبه می‌شود:

در رابطه اخیر A دامنه در نیم دوره و ولتاژ خازن در لحظه اعمال ولتاژ در ابتدای نیم دوره است. بنابراین ولتاژ اولیه خازن در پایان هر نیم دوره به صورت دائم از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$v_C\left(\frac{T}{2}\right) = m_1 A_n + m_2 v_C\left[(n-1)\frac{T}{2}\right] \quad (17)$$

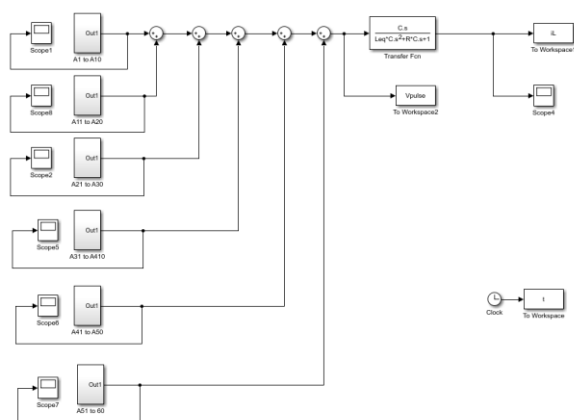
از طرف دیگر حداکثر مقدار دامنه جریان در هر نیم دوره باید در زمان های $t = T/4 + nT/2$ باشد. بر این اساس با توجه به رابطه ۱۳ جریان ماکزیمم هر نیم دوره به صورت دائم از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$i\left(\frac{T}{4} + n\frac{T}{2}\right) = m_3 \left\{ A_n - v_C\left[(n-1)\frac{T}{2}\right] \right\} \quad (18)$$

$$m_3 = 7/174849 \times 10^{-3}$$

در نهایت با فرض ولتاژ اولیه صفر و داشتن دامنه جریان ایده آل در نقاط $t = T/4 + nT/2$ بر اساس سیگنال لورن ایده آل می توان مقادیر A_n را محاسبه نمود. برای این کار کافی است با لحاظ مقدار اولیه صفر در ولتاژ خازن، مقدار A_1 را از رابطه ۱۸ محاسبه کرد و با جایگذاری آن در رابطه ولتاژ (رابطه ۱۰)، A_2 را محاسبه نمود و این کار را تا رسیدن به همه دامنه های لازم ادامه داد.

برای استخراج دامنه هر نیم دوره، شبیه ساز مدار مطابق با شکل ۱۴ در نرم افزار MATLAB طراحی می شود. مقادیر به دست آمده برای دامنه پالس ها با نمادگذاری A_1 تا A_6 به تابع تبدیل مدار معادل آنتن اعمال می گردد. در نهایت دامنه ولتاژ اعمالی به صورت شکل ۱۵ به دست می آیند.



شکل ۱۴. شبیه ساز مدار تولید پالس لورن استاندارد در نرم افزار MATLAB

$$v_1(t) = (1 - e^{-\alpha t} \cos \beta t + \frac{\alpha}{\beta} e^{-\alpha t} \sin \beta t - \frac{\gamma \alpha}{\beta} e^{-\alpha t} \sin \beta t) u(t) \quad (10)$$

در این روابط:

$$K = \gamma \sqrt{\frac{C}{\epsilon L - R^2 C}} = 7/278 \times 10^{-3} \quad (11)$$

$$T = \frac{1}{f} = 10 \mu s, \quad f = 10 \cdot kHz$$

و:

$$\alpha = \frac{R}{2L} = 5/707 \times 10^3 \quad (12)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = 6/274 \times 10^5$$

با توجه به اینکه در پایان هر نیم دوره جریان عبوری از مدار صفر می شود، این نتیجه حاصل می گردد که جریان اولیه سلف برای اعمال در دوره بعدی صفر خواهد بود ولی باید ولتاژ خازن به عنوان مقدار اولیه نیم دوره بعدی لحاظ گردد. حداکثر دامنه جریان در هر نیم دوره ها در زمان های $t = T/4 + nT/2$ است. بر این اساس با توجه به رابطه ۸ برای دوره نخست نتیجه می شود که:

$$i\left(\frac{T}{4}\right) = K(A - V_0) e^{-\alpha \frac{T}{4}} \sin \beta \frac{T}{4} = \pi/2 = 7/174849 \times 10^{-3} [A - v_C(0)] \quad (13)$$

برای محاسبه ولتاژ خازن در لحظه $t = T/2$ هم می توان روابط زیر را بکار برد. با این رویکرد ولتاژ اولیه خازن از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$v_C\left(\frac{T}{2}\right) = A \left[v_1\left(\frac{T}{2}\right) - v_1(0) \right] + v_C(0) \left[1 - v_1\left(\frac{T}{2}\right) \right] \quad (14)$$

با توجه به رابطه ۱۰، در لحظه اعمال پالس نخست می توان نتیجه گرفت که:

$$v_1(0) = 0, \quad T = \frac{2\pi}{\beta} \Rightarrow v_1\left(\frac{T}{2}\right) = 1 + e^{-\alpha \frac{T}{2}} \quad (15)$$

پس:

$$v_C\left(\frac{T}{2}\right) = A(1 + e^{-\alpha \frac{T}{2}}) - v_C(0)e^{-\alpha \frac{T}{2}} = m_4 A + m_5 v_C(0) \quad (16)$$

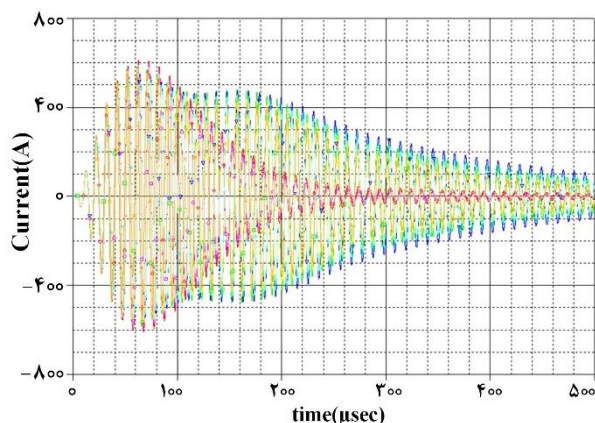
$$m_4 = 1/971868, \quad m_5 = -0/971868$$

۵. شبیه‌سازی

است و جدول ۳ نتایج شبیه‌سازی را با بررسی شش پارامتر مهم سیگنال لورن ارائه می‌دهد.

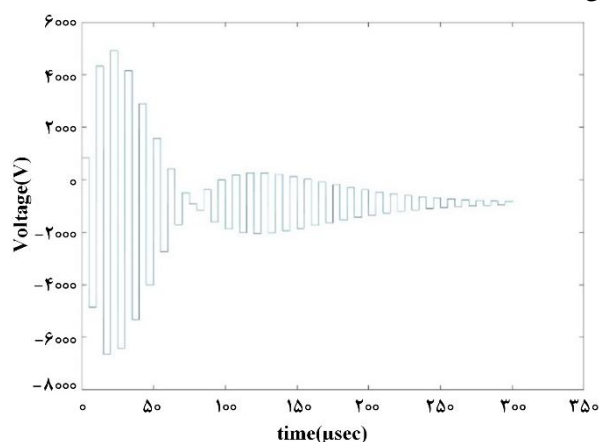
جدول ۲. سناریوهای در نظر گرفته شده برای تغییر مقاومت و سلف

حالت	تغییر مقاومت (درصد)	تغییر سلف (درصد)	مقاومت (Ω)	سلف (μH)
۱	-۱۰	-۱۰	۲/۲۵	۱۶۱/۱
۲	-۱۰	۰	۲/۲۵	۱۷۹
۳	-۱۰	+۱۰	۲/۲۵	۱۹۶/۹
۴	۰	-۱۰	۲/۵	۱۶۱/۱
۵	بدون تغییر (تغییر صفر درصد)		۲/۵	۱۷۹
۶	۰	+۱۰	۲/۵	۱۹۶/۹
۷	+۱۰	-۱۰	۲/۷۵	۱۶۱/۱
۸	+۱۰	۰	۲/۷۵	۱۷۹
۹	+۱۰	+۱۰	۲/۷۵	۱۹۶/۹



شکل ۱۶. جریان عبوری از مدار بدون استفاده از کنترل‌کننده برای حالت‌های جدول ۲

در بخش چهارم با اضافه کردن سلف متغیر و کنترل‌کننده تناسبی، دامنه ولتاژ مورد نیاز متناسب با مقادیر سلف به همراه مقاومت و خازن استخراج می‌شود و به مدار معادل آنتن اعمال می‌گردد. دلیل اصلی طراحی کنترل‌کننده احتمال تغییر پارامترهای مدار معادل آنتن تحت تاثیر شرایط جوی است. برای این منظور مقادیر سلف یا مقاومت با ده درصد خطا نسبت به مقادیر ایده‌آل در نظر گرفته شده و جریان عبوری از مدار مشاهده و با استانداردهای سیگنال لورن مقایسه و تحلیل می‌شود.

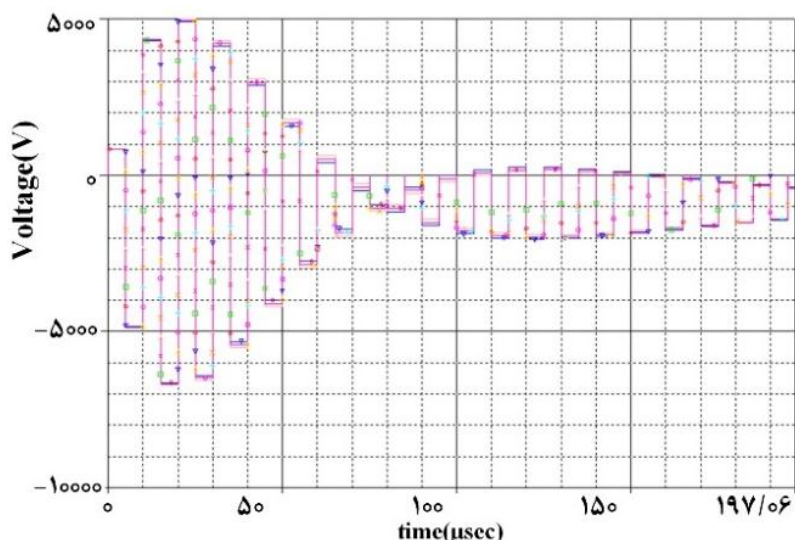


شکل ۱۵. دامنه ولتاژ به دست آمده در نرم‌افزار MATLAB

حالت‌های محتمل در شرایطی که خازن $11/9\text{nF}$ و مقاومت و سلف در محدوده $\pm 10\%$ درصد تغییر کنند در جدول ۲ آمده است.

شکل ۱۶ جریان عبوری از مدار را بدون استفاده از کنترل‌کننده نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل پیداست، تغییر در مقادیر بار معادل با آنتن، نقاط اوج و عبور از صفر را به میزان بسیار زیادی تغییر می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده اختلاف فاحشی با آستانه‌های قابل قبول به دلیل تغییر در مقدار بار و خارج شدن پارامترهای سیگنال حاصل از مقادیر مجاز است.

چنانچه از کنترل‌کننده طراحی شده استفاده شود، شکل ۱۷ دامنه پالس‌های محاسبه شده را نشان می‌دهد. همچنین جریان‌های عبوری در تهِ حالت بررسی شده در شکل ۱۸ آمده



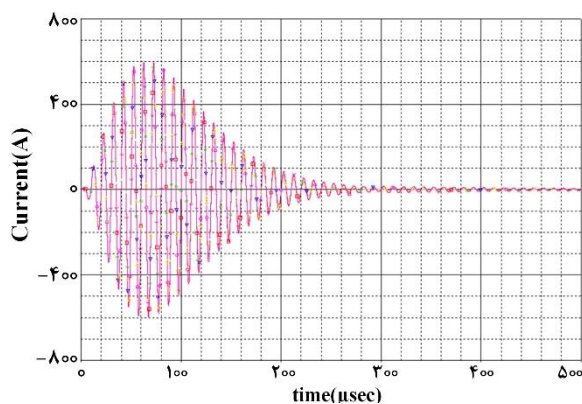
شکل ۱۷. دامنه ولتاژ محاسبه شده برای حالت‌های جدول ۲

جدول ۳. مشخصه‌های جریان لورن با وجود کنترل‌کننده برای حالت‌های جدول ۲

شماره حالت									حد قابل قبول	پارامتر
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۰/۰۰۰۶۳۲	۰/۰۰۰۶۲۰	۰/۰۰۰۵۰۱	۰/۰۰۰۷۵۷	۰/۰۰۰۶۸۵	۰/۰۰۰۷۵۷	۰/۰۰۰۷۵۷	۰/۰۰۰۷۵۷	۰/۰۰۰۶۸۴	۰/۰۱۶	نسبت دامنه در ۵۰۰ms نسبت به ماکزیمم دامنه
۰/۳۱	۰/۳۳	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۳۵	۰/۳۶	۱۰۰۰	حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌دوره نخست (IS)
۳/۴۹	۳/۴۷	۳/۴۸	۳/۱۲	۳/۱۳	۳/۱۳	۲/۸۰	۲/۸۲	۲/۸۱	۱۰۰	حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌دوره دوم تا دوازدهم (IS)
۰/۰۱۳۷۶	۰/۰۱۸۷۵	۰/۰۱۸۷۵	۰/۰۱۸۷۵	۰/۰۱۸۷۵	۰/۰۱۸۷۵	۰/۰۱۸۷۵	۰/۰۱۸۷۵	۰/۰۱۸۶۷	۰/۰۱	متوسط مجموع مربع خطای نقاط اوج در ۸ نیم‌دوره نخست (MMSE)
۰/۰۱۸۲۶۴	۰/۰۲۴۶۵۵	۰/۰۲۴۶۵۷	۰/۰۲۴۶۵۵	۰/۰۲۴۶۵۱	۰/۰۲۴۶۵۱	۰/۰۲۴۶۵۶	۰/۰۲۴۶۵۴	۰/۰۲۴۶۵۵	۰/۰۳	حداکثر خطای نقاط اوج در ۸ نیم‌دوره نخست
۰/۰۱۴۷۹۹	۰/۰۲۱۴۰۵	۰/۰۲۱۳۹۳	۰/۰۲۱۴۰۳	۰/۰۲۱۴۰۴	۰/۰۲۱۳۹۹	۰/۰۲۱۳۹۹	۰/۰۲۱۳۹۸	۰/۰۲۱۳۸۴	۰/۱	خطای نقاط اوج در نیم‌دوره نهم تا سیزدهم

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مولدهای لورن مبتنی بر سوئیچینگ با در نظر گرفتن مشخصه امپدانس آنتن طراحی و پیاده‌سازی می‌شوند. در این صورت با توجه به امکان تغییر المان‌های آنتن به دلیل شرایط محیطی، طراحی حلقه باز نمی‌تواند شرایط پایداری را برای جریان عبوری محقق سازد. برای حل این مشکل، در این مقاله سامانه کنترل حلقه بسته پیشنهادی طراحی و شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد در حالت حلقه بسته، با وجود کنترل‌کننده تمام حدود مجاز برای جریان لورن به ازای نوسان ده درصد در بار آنتن با دقت قابل قبولی احصاء می‌شود.



شکل ۱۸. جریان عبوری از مدار با استفاده از کنترل‌کننده

برای حالت‌های جدول ۲

۷. مراجع

- [10] W. J. Pelgrum, "New potential of low-frequency radionavigation in the 21st century", Delft University of technology, 2006.
- [11] P.-W. Son, J.H. Rhee, J. Seo, Novel multichain-based Loran positioning algorithm for resilient navigation, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* Vol. 54, No. 2 Apr. 2018.
- [12] Johnson, G.; Shalaev, R.; Hartnett, R., Swaszek, P.; Narins, M. "Can Loran Meet GPS Backup Requirements?"; *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2005, 20, 3-12.
- [13] Lin, H.; Zhou, H.; Liu, F. "Research on Phase Coding Identification of Loran-C Signal under the Background of Strong CWT"; *J. Test. Measur. Tech.* 2012, 52, 252-255.
- [14] Beckmann, M. "Synchronous Interference to Loran-C and its Influence on Cycle Identification"; *Proc. Int. Conf. the Wild Goose Association* 1990, 105-113.
- [15] Bayat, M.; Madani, M. H. "Analysis and Simulation of a Hybrid Filter to Cancel Cross Rate Interference in Loran System"; *Advanced Defence Sci. & Tech.* 2017, 4, 51-60.
- [16] Helwig, A.; Offermans, G.; Stout, C.; Schue, C. "Next Generation Low Frequency Solutions for Alternative Positioning, Navigation, Timing, and Data (PNT&D) Services and Associated Receiver Technology"; *Proc. Int. Meeting (ITM), ION* 2012, 1221-1232
- [17] Van Der Wal, P. W.; Van Willigen, D. "Hard Limiting and Sequential Detection Applied to Loran C"; *IEEE Trans. Aerospace Elec. Sys.* 1978, 64, 649-661.
- [18] Bayat, M.; Mazloom, J. "Design and Simulation of a Linear Adaptive System to Eliminate the Effect of Single-frequency Jammer in Warplane Data Link"; *J. Aeronautical Eng.* 2016, 18, 51-59.
- [19] Frank, R. L. "Multiple Pulse and Phase Code Modulations in the Loran C System"; *IRE Trans. Aeronautical. Nav. Elec.* 1960, 7, 55-61.
- [20] Last, D., Bian, Y. "Carrier Wave Interference and Loran-C Receiver Performance"; *IEE Proceedings-F* 2008, 140, 273-283.
- [21] Zhou, L. L.; Xi, X. L.; Liu, J. F.; Yu, N. M. "LF Ground Wave Propagation Over Irregular Terrain"; *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2011, 59, 1254-1260.
- [1] سید اسماعیل شهرآیینی، فرهاد فرنیاء، "راهبردهای پدافند غیرعامل در حوزه رادار متناسب با تهدید ناهمطراز"، فصلنامه علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، شماره ۱، پائیز ۹۷، صفحات ۹۸-۱۱۴.
- [2] Bayat, M.; Madani, M. H. "Loran Phase Code Revisited for Continuous Wave Interference Cancellation"; *IET Sci. Measurement & Tech.* 2017, 11, 322-330.
- [3] Arthur, H.; Gerard, O.; Chris, S.; Charles, S. "Design and Performance of a Low Frequency Time and Frequency Dissemination Service"; *Proc. Int. Meeting, FAA APNT Public* 2013, 75-84.
- [4] Helwig, A.; Offermans, G.; Schue, C. "Low Frequency (LF) Solutions for Alternative Positioning, Navigation, Timing and Data (APNT&D) and Associated Receiver Technology"; *Proc. Int. Meeting (ITM), ION* 2011, 166-183.
- [5] Narins, M. "Alternative Positioning, Navigation, and Timing Initiative Assumptions and Requirements"; *Proc. Int. Meeting. FAA APNT Public* 2010, 41-49
- [6] Johnson, G.; Shalaev, R.; Hartnett, R., Swaszek, P.; Narins, M. "Can Loran Meet GPS Backup Requirements?"; *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2005, 20, 3-12.
- [7] Johnson, G. W.; Swaszek, P. F.; Hartnett, R. J.; Shalaev, R.; Wiggins, M. "An Evaluation of eLoran as a Backup to GPS"; *IEEE Conf. on Technologies for Homeland Security*, 2007, 95-100.
- [8] Lili, Z.; Xi, X.; Zhang, J.; Pu, Y.; "A New Method for Loran-C ASF Calculation Over Irregular Terrain"; *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49, 1738-1744.
- [9] Specification of the transmitted Loran-C signal, U.S department of transportation, U.S Coast Guard, <https://www.navcen.uscg.gov> (Sep. 12, 2013).

- [26] Wei, X.; Yan, L.; Qing, L. "Loran-C Synchronous Interference Suppression Using Improved Adaptive Algorithms"; IEEE Trans. Audio. Speech. Language Proc. 2007, 57, 47-49.
- [27] Yinbing, Z.; Xu, J.; Qiu, T.; Cui, G. "Synchronous Carrier Wave Interference Suppression Based on Accumulation and Average in Loran-C"; The Ninth IEEE International Conf. on Electronic Measurement & Instruments, 2009.
- [28] Dean, C. B. "Automatic Pulse Sharping with the AN/FPN-42 and AN/FPN-44A Loran-C Transmitters"; Master's Thesis, Naval Postgraduate School, 1992.
- [29] Lili, Z.; Xi, X.; Zhang, J.; Pu, Y.; "A New Method for Loran-C ASF Calculation Over Irregular Terrain"; IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2013, 49, 1738-1744.
- [22] Tim, H. "Next Generation LF Transmitter for (e) Loran Systems"; Nautel Limited. 2008.
- [23] Khorrami, A., Afifi, A.; Amiri, P., Aghazade, T.; "Design and Fabrication of a Loran Pulse Based on PWM Method for LPS Navigation System"; Journal of Radar. 2014, Vol. 2, pp. 51-58 (in Persian).
- [24] Khorrami, A.; Afifi, A.; Ghezelayagh, M.H.; Amin, A.R.; "Extraction of Optimum PWM Levels in LORAN Switching Transmitter for Using in Ground-Based Positioning System"; Advanced Defence Sci.& Tech. Journal, Vol. 2, pp. 351-360, 2019 (in Persian).
- [25] Khorrami, A.; Afifi, A.; Ghezelayagh, M.H.; "Design and analysis of loran transmitter based on PWM switching and OMOE indicator"; AEÜ International Journal of Electronics and Communications, Vol. 111, pp. 1-8, Nov. 2019.