

## علمی-پژوهشی

تحلیل قابلیت اطمینان در مولد سوئیچینگ سیگنال لورن حلقه باز  
با استفاده از شاخص کلی اثربخشیاباذر خرمی<sup>۱</sup>، احمد عیفی<sup>۲\*</sup>، محمدحسین قزل‌ایاغ<sup>۳</sup>، احمدرضا امین<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتر، ۲- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۳- دانشیار، ۴- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۸/۴/۳۱، پذیرش: ۹۸/۸/۱)

## چکیده

برای طراحی فرستنده سوئیچینگ لورن مبتنی بر مدولاسیون عرض پالس (PWM) چند سطحی، سناریوهای مختلفی برای چیدمان تقویت‌کننده‌ها و تعداد سطوح مدولاسیون وجود دارد که باید در ابعاد مختلف مورد بررسی قرار گیرند. قابلیت پیاده‌سازی، تحقق استانداردهای پالس لورن و تحلیل قابلیت اطمینان سه مشخصه مهم در این زمینه هستند. در این مقاله با استفاده از نتایج شبیه‌سازی، قابلیت اطمینان انواع مولدهای لورن حلقه باز مبتنی بر سوئیچینگ عرض پالس با تعداد سطوح مختلف به کمک شاخص کلی اثربخشی (OMO) بررسی شده است. برای این کار با انتخاب مشخصه‌های اساسی و تعیین وزن هر کدام از آنها، مقدار هدف و کمینه قابل قبول هر مشخصه بر مبنای استانداردهای لورن تعیین و OMO بر مبنای سناریوهای مورد نظر به دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد آرایش مدولاسیون عرض پالس سه سطحی با OMO به میزان ۰/۵۷۳، ۰/۵۰۶ و ۰/۴۵۱ به ترتیب برای حالت‌های بدون بلوک آسیب‌دیده، یک و دو بلوک آسیب‌دیده با میانگین ۰/۵۱۰ بهترین ساختار از نظر قابلیت اطمینان است. در مدولاسیون دامنه و مدولاسیون عرض پالس با هفت و یازده سطح، میانگین این شاخص برای سه حالت مذکور به ترتیب برابر ۰/۴۵۵، ۰/۴۶۳ و ۰/۴۸۵ می‌باشد که مقدار کمتری نسبت به ساختار بهترین دارند.

**کلیدواژه‌ها:** فرستنده لورن، مدولاسیون عرض پالس چندسطحی، قابلیت اطمینان، تقویت‌کننده سوئیچینگ، شاخص کلی اثربخشی

## ۱- مقدمه

حاصل شد که باید به فکر ایجاد یک پشتیبان برای سامانه‌های موقعیت‌یاب فضاپایه بود [۳-۴].

به جز مشکلات متصور GPS در ایالات متحده آمریکا، برای سایر کشورها مشکلات افزون‌تری نظیر تأخیر زمانی و خطای دقت، عدم دسترسی و امکان بهره‌برداری از تمام خدمات قابل ارائه و اختلال در به‌کارگیری بر اساس رویکرد مرکز کنترل و فرماندهی وجود دارد و با در نظر گرفتن این موارد در بسیاری از کشورها نیاز به یک سامانه پشتیبان برای GPS از اهمیت بیشتری برخوردار است [۵-۹].

با توجه به همه این ناکارآمدی‌ها، علی‌رغم کم‌توجهی به استفاده و توسعه سامانه‌های موقعیت‌یاب پرتوان زمین‌پایه در چند دهه اخیر، مجدداً سامانه‌های مذکور مورد توجه جدی قرار گرفتند [۱۰]. برای این کار با احصاء نیازمندی‌های جدید و درک مشکلات GPS، به‌روزرسانی و ارتقاء «سامانه لورن» در اوایل قرن بیست و یکم توسط ایالات متحده آمریکا مطرح گردید و توسعه آن بر مبنای فناوری‌های جدید آغاز شد.

در تمام کاربردهای مهم سامانه موقعیت‌یابی جهانی<sup>۱</sup> که در صورت خلل در عملکرد توانمندی لطمه‌های جدی اقتصادی و استراتژیکی را دارند، یک سامانه پشتیبان قابل اتکا به‌منظور تعیین دقیق موقعیت و زمان لازم است [۱] چراکه خدمات و کاربردهای این سامانه قابلیت ابتلا به انواع مختلفی از تداخل را دارد و باید اثرات این آسیب‌پذیری‌ها در کاربردهای مختلف مورد مطالعه قرار گیرد [۲]. اختلال و فریب عمدی و غیرعمدی GPS کارچندان دشواری نیست. این امر ناشی از ماهیت سیگنال کم‌قدرت دریافتی است چراکه ماهواره‌های آن ۲۰۰۰ km بالاتر از سطح زمین قرار دارند و زمانی که سیگنال به زمین می‌رسد بسیار تضعیف می‌شود به‌گونه‌ای که یک مختل‌کننده<sup>۲</sup> ۱۳ وات می‌تواند استفاده از آن را مختل کند [۲]. بر این مبنای هرچند در ابتدا به نظر می‌آمد این سامانه حداقل برای کشوری مانند آمریکا با قدرت کنترل GPS به‌علت وجود مراکز کنترل و فرماندهی آن در این کشور بتواند همه نیازها را برآورده کند، بعدها این جمع‌بندی

\* رایانامه نویسنده پاسخگو: afifi@mut.ac.ir

<sup>3</sup> LORAN: Long Range Navigation<sup>1</sup> GPS: Global Positioning System<sup>2</sup> Jammer

مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر هر چند پیش‌بینی رفتار آتی سامانه نمی‌تواند با قطعیت کامل بیان شود، اما لازم است با انتخاب قطعات مناسب، اتخاذ روش‌های درست، در نظر گرفتن جایگزین‌های مناسب، مدل‌سازی ریاضی، تحلیل-های آماری و شبیه‌سازی‌های کامپیوتری برآورد مناسبی از قابلیت‌اطمینان آن به‌دست آید. این کار مبنای تصمیم‌گیری‌های مهندسی است و فرآیند طراحی را از بررسی کیفی به بررسی کمی سوق می‌دهد تا به کمک آن تصویر واضح‌تری از طرح مشاهده گردد [۱۸].

یکی از روش‌های تحلیل قابلیت‌اطمینان بر پایه استفاده از مدل‌های ریاضی و آماری، استفاده از شاخص کلی اثربخشی<sup>۳</sup> است [۱۷]. این شاخص زمانی استفاده می‌شود که برای سامانه‌های مانند لورن با چندین مشخصه عملیاتی، کاربردها و مأموریت‌های متعددی متصور گردد که ارزش و وزن هر یک از مشخصه‌ها در مأموریت‌های مختلف، متفاوت است. برای استخراج OMOE لازم است سناریوهای مختلفی مطرح گردد. با توجه به اهمیت کارکردن بلادرنگ سامانه، موضوع بسیار مهمی که در سناریوهای تحلیل این پژوهش مدنظر قرار گرفته، خرابی و حذف ناخواسته چند بلوک قبل از جایگزینی بلوک‌های پشتیبان است. با این رویکرد لازم است در حالت‌های مختلف آرایش و ساختار مدار بررسی شود و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی در قالب شاخص مذکور استخراج گردد.

در این مقاله پس از بیان ویژگی‌های سیگنال لورن و ارائه توضیحاتی در خصوص شاخص OMOE، آرایش‌های پیشنهادی تولید سیگنال لورن و سناریوهای خطا در هر یک از آن‌ها بیان می‌گردد و پس‌از آن با استخراج و تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی، آرایش بهینه به کمک شاخص OMOE ارائه می‌شود.

## 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 شکل 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 به‌هنجار شده به‌صورت زیر است [۱۹-۲۰].

$$i(t) = e^{\alpha} \times \left( \frac{t - \tau}{65 \times 10^{-6}} \right)^2 e^{-\frac{\gamma(t-\tau)}{65 \times 10^{-6}}} \times \sin(2\pi \times 10^5 t + PC); \quad \tau \leq t \leq 65 + \tau \quad (1)$$

در رابطه اخیر،  $e^{\alpha}$  ضریب نرمالیزاسیون نپری است و به‌گونه‌ای

یکی از کشورهایی که با توجه به موقعیت راهبردی‌اش در منطقه غرب آسیا توانسته به دانش فنی تولید انواع مختلفی از موقعیت‌یاب‌های پشتیبان GPS از جمله «سامانه موقعیت‌یاب لورن ارتقاء یافته» دست یابد جمهوری اسلامی ایران است که در حال حاضر موفق به تولید نمونه‌های آزمایشگاهی این سامانه شده است. سامانه مذکور با نقاط تمایز قابل‌توجهی نسبت به سامانه‌های مشابه، مشتمل بر فرستنده‌های پر قدرت چند مگاواتی زمین‌پایه، آنتن‌های زمینی، سازوکارهای هم‌زمانی فرستنده‌ها با قدرت چند نانواتی و گیرنده‌های لورن می‌باشد که راه‌اندازی کامل آن امکان مکان‌یابی امن اشیاء ثابت و متحرک با دقت بالا و به‌صورت آبی با حفظ قابلیت عملکرد تجهیزات در شرایط بحران را در اختیار قرار می‌دهد. با توجه موارد مطرح‌شده و فرکانس نامی کار پائین به میزان ۱۰۰kHz با پهنای باند ۵kHz-۲۰، از دیگر ویژگی‌های این سامانه قابلیت نفوذ و موقعیت‌یابی در داخل شهرها، ساختمان‌ها و مناطق با موانع طبیعی فراوان (برای ایجاد پوشش مناسب در فضاهای بسته)، مقاومت در برابر جیمینگ، کارایی در شرایط متنوع آب و هوایی، دقت بالا، تأخیر زمانی غیرمحسوس، قابلیت انطباق با نیازمندی‌ها و شرایط کشور و راندمان، کارایی و قابلیت‌اطمینان مناسب است [۱۵-۱۲].

یکی از موارد قابل‌توجه تغییر در توپولوژی ساخت فرستنده است که این موضوع به روش‌های مختلفی مانند به‌کارگیری تقویت‌کننده‌های سوئیچینگ با مدولاسیون دامنه و مدولاسیون عرض پالس<sup>۱</sup> در آرایش‌های مختلف محقق می‌شود [۱۲ و ۱۶]. به‌عنوان نمونه نویسندگان این مقاله مولد پالس لورن بر مبنای تکنیک PWM سه‌سطحی مبتنی بر تقویت‌کننده‌های سوئیچینگ را در حد یک نمونه آزمایشگاهی طراحی و پیاده‌سازی کرده [۱۲] و با طرح ایده چندسطحی‌سازی PWM برای رفع مشکلات آرایش سه‌سطحی، تعداد سطوح بهینه مدولاسیون عرض پالس در مولد سیگنال لورن را مطرح نموده‌اند [۱۳] که در همه این نمونه‌ها از ترکیب تعدادی تقویت‌کننده کلاس D استفاده می‌شود.

از طرف دیگر یکی از موارد بسیار مهمی که در طراحی یک سامانه عملیاتی مورد توجه قرار می‌گیرد قابلیت‌اطمینان<sup>۲</sup> مناسب و در دسترس بودن است. به‌گونه‌ای که سامانه با گذشت زمان از جنبه‌های مختلف فنی، اقتصادی و انسانی برای کاربرانش قابل‌اتکاء باشد [۱۷-۱۸]. از این منظر تحلیل قابلیت‌اطمینان روش‌های مطرح‌شده در مقایسه با سایر روش‌ها، بخش مهمی از فرآیند طراحی است که در آن عملکرد سامانه در شرایط عملیاتی

<sup>۱</sup> PWM: Pulse Width Modulation

<sup>۲</sup> قابلیت‌اطمینان، احتمال کارکرد بدون خرابی در تحت شرایط عملکردی مشخص و در تعداد معینی از سیکل‌های عملکردی یک سامانه است.

<sup>۳</sup> OMOE: Overall Measure Of Effectiveness

**الف - ECD:** مقدار مجاز این مشخصه  $\pm 2.5 \mu s$  است که این شرط بر مبنای خطای جذر میانگین مربعات<sup>۴</sup> به صورت رابطه (۳) بیان می‌شود. در این رابطه  $I_n$  بیان گر دامنه سیگنال ایده آل و  $S_n$  بیان گر دامنه سیگنال به دست آمده است.

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

ب- خطای نقاط اوج: هر یک از نقاط اوج در ۱۳ نیم سیکل اول باید در روابط (۳) و (۴) صدق کند.

$$|I_N - S_N| \leq 0.03 ; 1 \leq N \leq 8 \quad (3)$$

$$|I_N - S_N| \leq 0.10 ; 9 \leq N \leq 13 \quad (4)$$

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

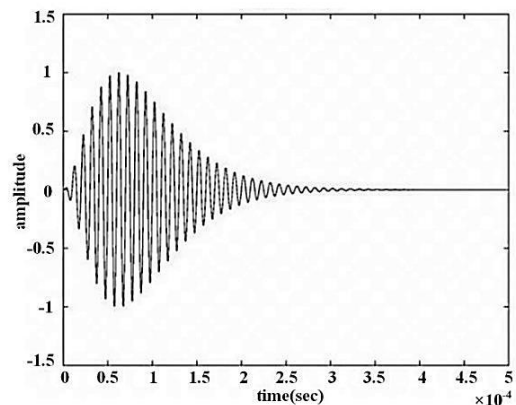
ج- زمان‌های عبور از صفر لبه پیشرو پالس و میزان خطای آن‌ها: با توجه به دسته بندی لبه‌های پیشرو پالس و بسته به مقدار خطای ECD نوسان مجاز خطای نقاط عبور از صفر لبه‌های پیشرو برای یک پالس استاندارد لورن (با فرکانس ۱۰۰ kHz و به ازای ECD برابر با صفر) در جدول (۱) نشان داده شده است. مطابق با این جدول نقطه عبور از صفر استاندارد ۳۰s است و این بدان معنی می‌باشد که پالس از لحظه ۲۵s- شروع می‌شود.

**جدول (۱):** نوسان مجاز خطای زمان‌های عبور از صفر [۲۴].

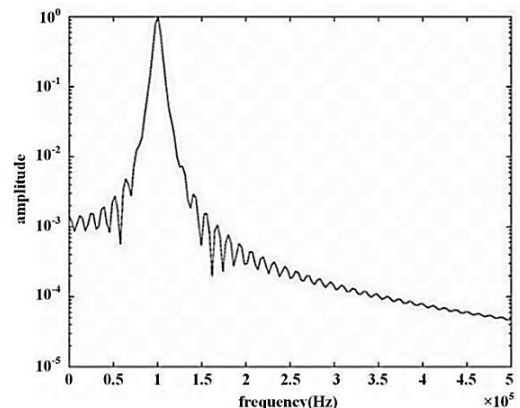
نوسان مجاز خطا (ns)	زمان (μs)	نقطه عبور از صفر استاندارد (μs)
±۱۰۰۰	-۲۵	۵
±۱۰۰	-۲۰	۱۰
±۷۵	-۱۵	۱۵
±۵۰	-۱۰	۲۰
±۵۰	-۵	۲۵
-	عبور از صفر استاندارد	۳۰
±۵۰	۵	۳۵
	۱۰	۴۰
	۱۵	۴۵
	۲۰	۵۰
	۲۵	۵۵
	۳۰	۶۰

د- چنانچه دامنه بیشینه با A نشان داده شود- که در حالت

تعیین گردیده که حداکثر دامنه جریان لورن برابر با واحد باشد. همچنین  $\tau$  بیانگر تفاضل پوش به سیکل در هشت نیم سیکل اول<sup>۱</sup> و PC<sup>۲</sup> مشخصه گذاری فاز می‌باشد که در حالت مثبت برابر با صفر و در حالت منفی برابر با  $\pi$  است. همان گونه که از این رابطه پیداست، تابع دامنه با یک موج سینوسی ۱۰۰ kHz مدوله شده است [۲۱]. سیگنال لورن بهنجار ایده آل در شکل (۱) و طیف سیگنال در شکل (۲) نشان داده شده است. این شکل مربوط به FFT<sup>۳</sup> سیگنال لورن با حذف مقادیر خارج از محدوده صفر تا ۲۵۰ μs و نرخ ۱۰ ns می‌باشد.



شکل (۱): سیگنال لورن بهنجار ایده آل [۲۲].



شکل (۲): طیف سیگنال لورن بهنجار [۲۲].

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 (۶۵s μ) نخست) و بخش دوم «لبه‌های پسرو» است که از نقطه اوج دامنه سیگنال تا زمان اکت کامل آن (از ۶۵s μ تا زمان اکت کامل سیگنال در ۲۵۰s μ یعنی ۱۸۵s μ بعد) را شامل می‌شود. مشخصه‌های استاندارد برای سیگنال لورن ارسالی از فرستنده شامل موارد زیر است [۲۳]:

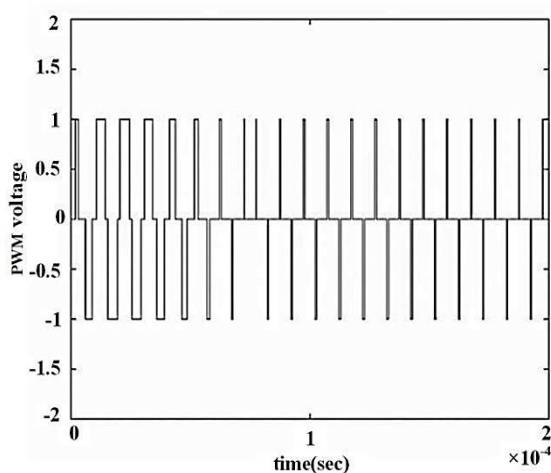
<sup>۱</sup> ECD: Envelope-to-Cycle Difference

<sup>۲</sup> PC: Phase Code

<sup>۳</sup> FFT: Fast Fourier Transform

<sup>۴</sup> MMSE: Minimum Mean Square Error

مدنظر قرار گیرد، امکان تولید ولتاژهایی وجود دارد که ضریب صحیحی از این عدد باشند. مثلاً به‌جای تولید ولتاژ ۹۱۵ V باید ولتاژ ۹۰۰ V با روشن شدن سه بلوک تولید شود. این موضوع یک خطای ناشی از کاهش دامنه را در پی دارد. موضوع دیگر این است که در هر سیکل باید تعدادی از طبقات به‌عنوان مکمل یکدیگر عمل کنند تا ولتاژ خواسته‌شده تولید شود و در مثال ذکر شده ترکیب سه بلوک ولتاژ مذکور را تولید می‌کند. خطای دومی که ممکن است اتفاق بیافتد آسیب دیدن هر یک از بلوک‌ها است. ویژگی بارز مدولاسیون عرض پالس در حالت سه سطحی این است که هر بلوک به‌طور مستقل می‌تواند سیگنال لورن را تولید کند و با روشن کردن تعدادی دلخواهی از بلوک‌ها امکان تولید توان موردنظر فراهم خواهد شد. شکل (۵) ولتاژ PWM سه سطحی به‌دست‌آمده بر مبنای جریان لورن بهنجار را نشان می‌دهد.



شکل (۵): ولتاژ PWM سه‌سطحی بهنجار موردنیاز برای تحقق جریان لورن در آنتن [۱۲].

در روش PWM با توجه به حداقل زمان‌های لازم برای روشن و خاموش شدن ترانزیستورها، بعضی از عرض پالس‌های باریک قابل پیاده‌سازی نیستند. در اینجا بر مبنای دفترچه اطلاعات فنی ماژول نیم‌سیکل CAS300M12BM2 که در بازوی سوئیچینگ آرایش نهایی استفاده می‌شود، مقدار عدد مذکور ۱۸ μs است. این مشکل با چندسطحی کردن PWM مرتفع می‌گردد. برای این منظور پس از تعیین تعداد سطوح موردنظر، یک ضریب برای کاهش دامنه و افزایش عرض پالس به همان نسبت-انتخاب می‌شود به‌گونه‌ای که انرژی پالس تغییری نکند. مثلاً با نصف کردن دامنه پالس‌های غیرقابل پیاده‌سازی، در هر مرحله عرض آن‌ها دو برابر می‌شود و این کار تا جایی که عرض همه پالس‌ها بزرگ‌تر از ۱۸ μs باشد ادامه پیدا می‌کند. به‌عنوان نمونه چگونگی تغییر از آرایش سه‌سطحی به پنج و هفت سطحی در شکل (۶) آمده است. در نهایت فرآیند مذکور منجر به ایجاد یازده سطح

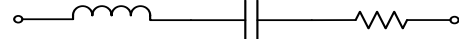
بهنجار برابر با یک است- باید نسبت دامنه در ۰.۵۰۰s پس از شروع سیگنال به دامنه بیشینه کمتر از ۰/۱۶A باشد.

همچنین بار معادل با آنتن فرستنده معادل با یک RLC سری با  $R = 20.5 \Omega$ ،  $C = 11.5 nF$  و  $L = 117.9 \mu H$  است که برای به حداقل رساندن مقاومت راکتانسی آن یک سلف  $40 \mu H$  به مدار آنتن اضافه می‌شود [۲۸-۲۵]. از این‌رو، سلف معادل  $219 \mu H$  می‌باشد. شکل (۳) مدار معادل آنتن را نشان می‌دهد.

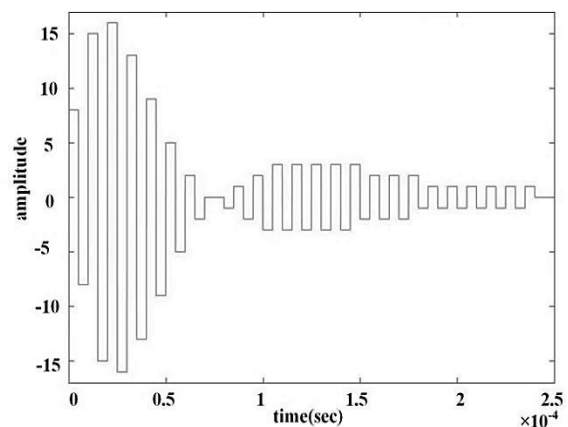
### ۳- تولید سیگنال لورن مبتنی بر سوئیچینگ

برای تولید سیگنال لورن به کمک تقویت‌کننده‌های سوئیچینگ دو روش پیشنهاد می‌شود. مبنای روش اول که توسط شرکت ناتل پیاده‌سازی شده استفاده از تعدادی تقویت‌کننده کلاس D بر مبنای مدولاسیون دامنه است [۱۵]. در این روش پالس نهایی از ترکیب خروجی تعداد محدودی تقویت‌کننده ایجاد می‌شود که دامنه هر یک از آن‌ها مشخص است. به‌عنوان نمونه شکل (۴) ولتاژ لورن قابل تحقق را با فرض وجود ۱۶ سطح نشان می‌دهد.

$$L = 219 \mu H \quad C = 11.5 nF \quad R = 20.5 \Omega$$



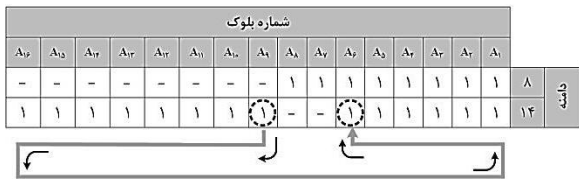
شکل (۳): مدار معادل آنتن [۱۵].



شکل (۴): دامنه پالس‌های تقریب زده شده ۱۶ سطحی [۱۲].

روش دیگر، فرستنده سوئیچینگ مبتنی بر PWM است که استفاده از آن مشکل وابستگی طبقات به یکدیگر و محدودیت تقریب هر یک از دامنه‌ها به نزدیک‌ترین مقدار ممکن را تا حد قابل قبولی مرتفع می‌کند [۱۲]. همان‌گونه که از شکل (۴) پیداست در مدولاسیون دامنه، با تلفیقی از n بلوک باید دامنه در هر سیکل مقداری بین A تا nA باشد. به‌عنوان مثال اگر  $A = 300$

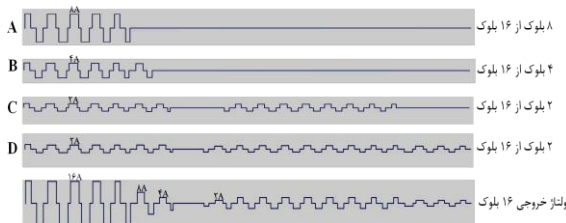
روشن شدن همه بلوک‌ها ایجاد خواهد شد که منجر به افزایش طول عمر فرستنده و به حداقل رساندن اثرپذیری بلوک‌ها از همدیگر می‌شود. به‌عنوان مثال اگر اولین دامنه ۸ باشد بلوک‌های  $A_1-A_8$  تولیدکننده این مقدار خواهند بود و با فرض اینکه دومین دامنه برابر با ۱۴ در نظر گرفته شود برای تولید آن از بلوک  $A_9$  شروع خواهد شد و پس از رسیدن به بلوک  $A_{16}$ ، روشن کردن بلوک‌ها مجدداً از بلوک  $A_1$  شروع و تا بلوک  $A_8$  ادامه پیدا خواهد کرد. شکل (۸) این چینش را نشان می‌دهد.



شکل (۸): نحوه توزیع روشن کردن متوازن بلوک‌ها.

#### ۴-۲- آرایش PWM هفت تا یازده سطحی

در تولید PWM هفت سطحی لازم است سطوح ولتاژ خروجی علاوه بر مقادیر اصلی که با  $\pm 1V$  و  $0$  نشان داده می‌شود، شامل  $\pm 0.5V$  و  $\pm 0.25V$  هم باشد که  $V$  دامنه ولتاژ خروجی با فرض روشن بودن همه بلوک‌ها است. برای تحقق این چینش ساختاری کافی است در تأمین دامنه  $\pm 1V$  تمام بلوک‌ها، در تأمین دامنه  $\pm 0.5V$  از بلوک‌ها و در تأمین دامنه  $\pm 0.25V$  یک‌چهارم بلوک‌ها روشن شوند. به همین صورت علاوه بر موارد مطرح‌شده، در آرایش نه سطحی برای تأمین دامنه  $\pm 0.125V$  یک‌هشتم بلوک‌ها و در آرایش یازده سطحی برای تأمین دامنه  $\pm 0.0625V$  یک‌شانزدهم بلوک‌ها روشن شوند. به‌عنوان نمونه شکل (۹) ترکیب بلوک‌های با دامنه فرضی  $A$  در آرایش نه سطحی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این شکل پیداست با ترکیب ۱۶ بلوک امکان تأمین ولتاژ فراهم خواهد شد.



شکل (۹): نحوه ایجاد PWM نه سطحی با ترکیب ۱۶ بلوک.

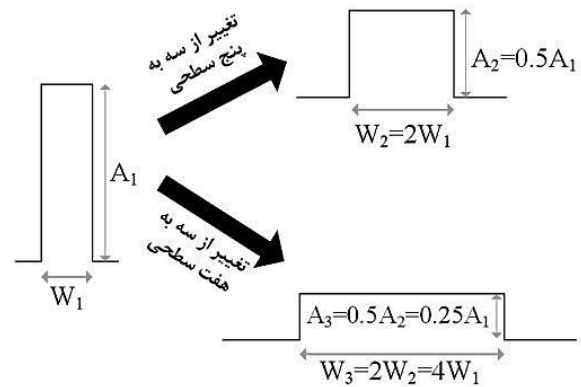
#### ۵- تشریح شاخص OMOE

شاخص OMOE بخشی از دانش مهندسی در طراحی و یکپارچه‌سازی سامانه‌ای است و به‌عنوان یک پیش‌نیاز مهم از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است به‌گونه‌ای که می‌تواند اطمینان از پشتیبانی تمامی مأموریت‌های تعریف‌شده برای

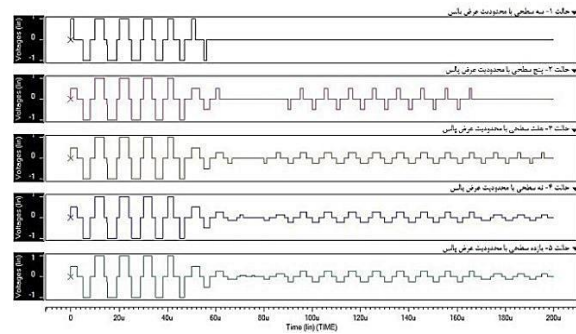
خواهد شد. شکل (۷) ولتاژ موردنیاز سه تا یازده سطحی را با حذف عرض پالس‌های کمتر از  $1\mu s$  نشان می‌دهد. تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی هر یک از این آرایش‌ها نشان می‌دهد که تنها حالت‌های هفت تا یازده سطحی می‌توانند استانداردهای مدنظر سیگنال لورن را تأمین نمایند. از این رو، در بررسی‌های آتی آرایش‌های سه و پنج سطحی مدنظر نخواهند بود.

#### ۴- چینش بلوک‌ها

برای این که بتوان به بررسی نقش هر یک از بلوک‌ها و اثر حذف احتمالی آن بر مشخصه‌های سیگنال لورن و قابلیت اطمینان پرداخت، لازم است که چینش و نقش بلوک‌ها در ساختار مولد لورن در هر یک از آرایش‌ها بررسی شود.



شکل (۶): نحوه چندسطحی‌سازی.



شکل (۷): سیگنال ولتاژ PWM سه تا یازده سطحی

قابل پیاده‌سازی.

#### ۴-۱- مدولاسیون دامنه

برای تولید ولتاژی مشابه با شکل (۴) نحوه به‌کارگیری هر یک از بلوک‌های تقویت‌کننده به این صورت تعریف می‌شود که چنانچه بلوک‌ها از  $A_1$  تا  $A_{16}$  نام‌گذاری شود، برای تولید دامنه‌ها شماره بلوک‌ها را پشت سر هم قرار داده و در هر نیم‌سیکل پس از آخرین بلوک روشن‌شده در نیم‌سیکل قبلی، بلوک‌های بعدی روشن می‌شوند و با رسیدن به بلوک آخر، چرخه روشن شدن از بلوک اول ادامه پیدا خواهد کرد. با این کار توزیع یکسانی برای



$$VOP_i = \frac{X_i - L_{vi}}{L_{vi} - L_{vi}} \quad (۵)$$

$$MOE_i = W_i \times VOP_i \quad (۶)$$

$$MOP_j = \sum_{i=1}^n W_i \times VOP_i = \sum_{i=1}^n MOE_i \quad (۷)$$

$$OMOE = \sum_{j=1}^m P_j \times MOP_j \quad (۸)$$

در این روابط  $X_i$  نشان‌دهنده مقدار به‌دست‌آمده برای مشخصه،  $L_{vi}$  مقدار آستانه طراحی مشخصه (کلید نیازمندی‌های اولیه در نظر گرفته‌شده برای طراحی)،  $L_{vi}$  مقدار هدف طراحی مشخصه (کلید نیازمندی‌های نهائی در نظر گرفته‌شده برای طراحی)،  $W$  وزن مشخصه<sup>۴</sup> و  $P$  احتمال رخداد است [۳۰] که چنانچه هیچ سناریوی خاصی برای خطا مفروض و محتمل نباشد، تنها یک مقدار  $MOP$  وجود دارد و به ازای آن  $P=1$  است. در این حالت حاصل روابط (۷) و (۸) یکسان می‌باشد. همچنین در صورت وجود سناریوهای خطا، به ازای هر یک از آن‌ها یک احتمال رخداد ( $P$ ) و یک سنجه کارایی ( $MOP$ ) وجود دارد و از رابطه (۸) مقدار  $OMOE$  به‌دست می‌آید.

برای دستیابی به آستانه و هدف طراحی، جمع‌آوری اطلاعات مرتبط با روش‌های مختلف با شبیه‌سازی روش‌های پیشنهادی انجام می‌شود. برای این منظور ابتدا اطلاعات موردنیاز جمع‌آوری و سپس به آنالیز آن‌ها پرداخته می‌شود. به این صورت که ابتدا  $MOE$  هر یک از مشخصه‌ها بر اساس رابطه (۶) محاسبه می‌شود و با تجمیع  $MOE$  هر کدام از روش‌ها مقدار  $OMOE$  به‌دست می‌آید [۳۲].

## ۶- شبیه‌سازی و تحلیل

پس از تبیین چگونگی تولید سیگنال و نحوه به‌کارگیری شاخص  $OMOE$ ، در این بخش سناریوهای تحلیل در هر یک از آرایش‌ها بیان خواهد شد. برای اینکه بتوان نتایج قابل قبولی از تحلیل‌های بیان‌شده استخراج کرد، علاوه بر آرایش‌های PWM هفت، نه و یازده سطحی، آرایش مولد مبتنی بر مدولاسیون دامنه هم مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین با فرض عدم امکان جایگزینی بلادرنگ بلوک‌ها سه سناریو برای آرایش حلقه باز مورد توجه خواهد بود. در سناریوی اول همه ساختارها بدون در نظر گرفتن امکان خرابی تحلیل می‌شوند و در سناریوی دوم و سوم حذف ناخواسته یک یا دو بلوک و اثر آن بر مشخصه‌های سیگنال و

زیرسامانه‌ها را افزایش دهد [۲۹] و توانایی سامانه را برای انجام مأموریت‌های موردنیاز تبیین کند. مقدار این شاخص بین صفر تا یک است که نزدیک‌بودن آن به یک، نشان‌دهنده تطبیق سامانه حاصل با انتظارات مدنظر در طراحی و نزدیک‌بودن این مقدار به صفر نشان‌دهنده متفاوت بودن نتایج با اهداف مورد نظر است. شاخص  $OMOE$  کاملاً به مأموریت سامانه وابسته است و با تحلیل نتایج نهایی می‌تواند در کنار شاخص‌هایی مانند تحلیل ریسک، امکان‌سنجی و هزینه برای انتخاب طرح بهینه (از میان طرح‌های مختلف) مورد استفاده قرار گیرد [۱۸].

در محاسبه  $OMOE$  پیچیدگی‌هایی وجود دارد که ناشی از وجود همبستگی و تأثیرات متقابل بین اجزاء در هر یک از سطوح، پیچیده و زمان‌بر بودن تعیین و اندازه‌گیری همبستگی‌ها، چندلایه بودن هر یک از سطوح و وجود تضاد (گاهی پنهان) در خواسته‌های مدنظر است.

به‌دست آوردن شاخص  $OMOE$  شامل سه مرحله تعیین نمودار سلسله مراتبی، اختصاص وزن و محاسبات ریاضی است. سلسله‌مراتب، تبیین ساختار سامانه و یک نمایش گرافیکی از مسئله است که برای نشان دادن ارتباط بین زیرسامانه‌ها و تأثیر آن‌ها بر روی رفتار و کارایی کل سامانه استفاده می‌شود [۱۸] و [۳۰]. پس از معرفی مشخصه‌های روش بر اساس مأموریت و رسم نمودار سلسله مراتبی، مرحله بعدی اختصاص وزن به هر قابلیت و مشخصه است. وزن‌دهی قابلیت‌ها و مشخصه‌ها باید بر اساس مأموریت و با همکاری بهره‌برداران انجام شود. بر این مبنا ممکن است یک قابلیت در دو مأموریت مختلف، دو وزن متفاوت داشته باشد [۳۰]. در مرحله سوم با استفاده از روابط ریاضی مشخص، مشخصه‌های مؤثر در محاسبه  $OMOE$  استخراج و مقدار آن محاسبه می‌شود. این مشخصه‌ها شامل مقدار کارایی ( $VOP$ )، سنجه‌های اثربخشی مأموریت ( $MOEs$ ) و سنجه‌های کارایی ( $MOPs$ ) است. کارایی یک روش توسط چندین شاخص مختلف بیان می‌شود و مشخص می‌کند که روش موردنظر از لحاظ یک سنجه کارایی در چه حدی است. این شاخص‌ها همان  $MOE$ ها هستند.  $MOE$  به‌عنوان زیرمجموعه  $OMOE$  تعریف می‌شود و نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری هر کدام از مشخصه‌های کلیدی در روش‌های مختلف است که ترکیب آن‌ها بر اساس درصد سهم آن با نظر بهره‌برداران تعیین می‌شود [۱۸] و [۳۱]. هر کدام از  $MOE$ ها نیز حاصل ترکیب یک سری مشخصه‌های دیگر با درصد سهم‌های متفاوت می‌باشد.

<sup>۴</sup> وزن هر پارامتر نشان‌دهنده میزان اهمیت آن نسبت به سایر پارامترها است و وزن‌دهی به گونه‌ای انجام می‌شود که جمع تمام اوزان یک باشد [۲۴].

<sup>۱</sup> VOP: Value Of Performance

<sup>۲</sup> MOE: Mission Of Effectiveness

<sup>۳</sup> MOP: Measures Of Performance

جدول (۲): مقادیر آستانه، هدف و وزن مشخصه‌های موردبررسی.

مشخصه	هدف	آستانه	وزن
نسبت دامنه در $500 \mu s$ نسبت به بیشینه دامنه	۰	۰/۰۱۶	۰/۱۱
حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌سیکل نخست (ns)	۰	۱۰۰۰	۰/۱۱
حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌سیکل دوم (ns)	۰	۱۰۰	۰/۱۱
حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌سیکل سوم (ns)	۰	۷۵	۰/۱۱
حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌سیکل چهارم تا دوازدهم (ns)	۰	۵۰	۰/۱۱
پهنای باند (kHz)	۵	۴	۰/۱۱
متوسط مجموع مربع خطای نقاط اوج در ۸ نیم‌سیکل نخست (MMSE)	۰	۰/۰۱	۰/۱۱
حداکثر خطای نقاط اوج در ۸ نیم‌سیکل نخست	۰	۰/۰۳	۰/۱۱
خطای نقاط اوج در نیم‌سیکل نهم تا سیزدهم	۰	۰/۱	۰/۱۱

### ۲-۶- سناریو دو: حذف ناخواسته یک بلوک

حذف ناخواسته بلوک‌ها بر مبنای نحوه چینش در تولید سیگنال نهایی پیاده و به کمک آن فرضیات مطرح و احتمال رخ دادن حذف هر بلوک به‌طور جداگانه موردبررسی قرار گیرد.

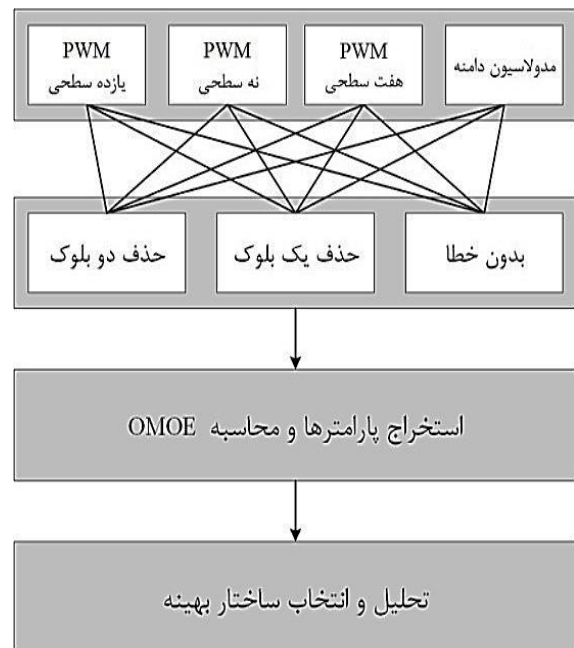
**الف - PWM هفت سطحی:** به‌عنوان نمونه سناریوهای حذف یک بلوک در حالت هفت سطحی به‌صورت کامل تشریح می‌گردد که برای حالت‌های دیگر قابل‌تعمیم است. اگر دامنه به‌نحارج خروجی هر بلوک به‌صورت واحد فرض شود، دامنه‌های صفر،  $\pm 16$ ،  $\pm 8$  و  $\pm 4$  توسط این آرایش تولید می‌شود. بر این اساس چنانچه یکی از بلوک‌های مدار آسیب ببیند، بسته به نقش آن حالت‌های خطای متصور، سیگنال خروجی ناشی از خطا و احتمال وقوع آن‌ها به‌صورت زیر قابل‌بیان است:

**الف-۱:** یکی از ۸ بلوک تولیدکننده سطح  $\pm 17$  (بلوک‌های با نماد A) از مدار خارج شده است. احتمال این حالت ۵۰٪ است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16$  به  $\pm 15$  تغییر خواهند کرد و سایر دامنه‌ها تغییری نمی‌کند.

**الف-۲:** یکی از ۴ بلوک تولیدکننده سطوح  $\pm 7$  و  $\pm 5$  (بلوک‌های با نماد B) از مدار خارج شده است. احتمال این حالت ۲۵٪ است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16$  به  $\pm 15$  و دامنه‌های  $\pm 8$  به  $\pm 7$  تغییر خواهند کرد ولی دامنه  $\pm 4$  تغییری نمی‌کند.

شاخص OMOE مدنظر قرار می‌گیرد. بر این اساس شکل (۱۰) نمودار سلسله‌مراتبی تحلیل را نشان می‌دهد. درواقع سلسله‌مراتب یک چکیده ساده از مراحل که اتفاق می‌افتد را نمایش می‌دهد که شامل روش‌های تولید سیگنال لورن، حالت‌های مختلف خرابی و مشخصات و ویژگی‌های مورد بررسی است.

در مرحله وزن‌دهی، به دلیل اهمیت یکسان همه ویژگی‌های سیگنال، وزن تمامی مشخصه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. بنابراین، به دلیل وجود نه مشخصه، مقدار وزن هر یک از آن‌ها  $0/11$  خواهد بود. پس از تعیین اوزان، آستانه و هدف (بیشینه و کمینه) تعیین می‌شود که آستانه هر یک از مشخصه‌ها همان مقدار قابل قبول است و هدف همه آن‌ها به‌جز پهنای باند رسیدن به مقدار صفر می‌باشد. در خصوص پهنای باند، هدف رسیدن به ۵ kHz است. مقادیر آستانه، هدف و وزن در جدول (۲) نشان داده شده است. برای محاسبه OMOE کافی است بر اساس روابط (۵) تا (۸) و این جدول، مقدار کارایی، سنج اثربخشی مأموریت، سنج کارایی و شاخص کلی اثربخشی استخراج شود.



شکل (۱۰): نمودار سلسله‌مراتبی.

### ۱-۶- سناریو یک: عملکرد صحیح تمام بلوک‌ها

جدول (۳) مشخصه‌های حاصل از شبیه‌سازی هر یک از آرایش‌ها با فرض اینکه همه بلوک‌ها به‌درستی کار کنند را نشان می‌دهد. در همه شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزارهای HSPICE و MATLAB استفاده شده است.

ناشی از خطا و احتمال وقوع آن‌ها به صورت زیر قابل بیان است:

ب-۱: یکی از ۸ بلوک تولیدکننده سطح  $\pm 1V$  از مدار خارج شده است. احتمال این حالت ۵۰٪ است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16 \pm 15$  تغییر خواهند کرد و سایر دامنه‌ها تغییری نمی‌کند.

ب-۲: یکی از ۴ بلوک تولیدکننده سطوح  $\pm 1V$  و  $\pm 0.5V$  از مدار خارج شده است. احتمال ۲۵٪ است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16 \pm 15$  و دامنه‌های  $\pm 8 \pm 7$  تغییر خواهند کرد ولی بقیه دامنه‌ها تغییری نمی‌کند.

ب-۳: یکی از دو بلوک تولیدکننده سطوح  $\pm 1V$ ،  $\pm 0.5V$  و  $\pm 0.25V$  از مدار خارج شده است. احتمال این حالت ۱۲٫۵٪ است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16$  به  $\pm 15$ ، دامنه‌های  $\pm 8$  به  $\pm 7$  و دامنه‌های  $\pm 4$  به  $\pm 3$  تغییر خواهند کرد.

ب-۴: یکی از دو بلوک تولیدکننده سطوح  $\pm 1V$ ،  $\pm 0.5V$ ،  $\pm 0.25V$  و  $\pm 0.125V$  از مدار خارج شده است. احتمال این حالت ۱۲٫۵٪ است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16$  به  $\pm 15$ ، دامنه‌های  $\pm 8$  به  $\pm 7$ ، دامنه‌های  $\pm 4$  به  $\pm 3$  و دامنه‌های  $\pm 2$  به  $\pm 1$  تغییر خواهند کرد.

**ج - PWM یازده سطحی:** در این آرایش ۸ بلوک تولید  $\pm 1V$  (با نماد A)، چهار بلوک تولید سطوح  $\pm 1V$  و  $\pm 0.5V$  (با نماد B)، دو بلوک تولید سطوح  $\pm 1V$ ،  $\pm 0.5V$  و  $\pm 0.25V$  (با نماد C) و یک بلوک تولید سطوح  $\pm 1V$ ،  $\pm 0.5V$ ،  $\pm 0.25V$  و  $\pm 0.125V$  (با نماد D) و یک بلوک دیگر تولید سطوح  $\pm 1V$ ،  $\pm 0.5V$ ،  $\pm 0.25V$  و  $\pm 0.125V$  (با نماد E) را بر عهده دارند. اگر دامنه بهنجار خروجی هر بلوک به صورت واحد فرض شود، دامنه‌های صفر،  $\pm 16$ ،  $\pm 8$ ،  $\pm 4$ ،  $\pm 2$  و  $\pm 1$  توسط این آرایش ایجاد می‌شود. بر این اساس چنانچه یکی از بلوک‌های مدار آسیب ببیند بسته به نقش آن حالت‌های خطای متصور، سیگنال خروجی ناشی از خطا و احتمال وقوع آن‌ها به صورت زیر قابل بیان است:

ج-۱: یکی از ۸ بلوک تولیدکننده سطح  $\pm 1V$  از مدار خارج شده است. احتمال این حالت ۵۰٪ است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16 \pm 15$  تغییر خواهند کرد و سایر دامنه‌ها تغییری نمی‌کند.

ج-۲: یکی از ۴ بلوک تولیدکننده سطوح  $\pm 1V$  و  $\pm 0.5V$  از مدار خارج شده است. احتمال این حالت ۲۵٪ است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16 \pm 15$  و دامنه‌های  $\pm 8 \pm 7$  تغییر خواهند کرد ولی بقیه دامنه‌ها تغییری نمی‌کند.

جدول (۳): استخراج مشخصه‌های سیگنال لورن

در سناریوی بدون خطا.

مشخصه	قابل قبول	مدولاسیون عرض پالس		
		مدولاسیون دامنه (تافل)	هفت سطحی	نه سطحی
نسبت دامنه در ۵۰۰µs نسبت به بیشینه دامنه	۰/۱۶	۰/۳۸	۰/۳۲	۰/۰۴
حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌سیکل نخست (ns)	۱۰۰	۶۱۱/۵	۶۱۱/۵	۶۱۱/۵
حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌سیکل دوم (ns)	۱۰	۴۸/۹	۴۸/۹	۴۸/۹
حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌سیکل سوم (ns)	۷۵	۲۵/۸	۲۵/۸	۲۵/۸
حداکثر خطای عبور از صفر در نیم‌سیکل چهارم تا دوازدهم (ns)	۵	۱۶/۶	۱۶/۶	۱۶/۶
پهنای باند (kHz)	۵	۳/۹	۴	۵
متوسط مجموع مربع خطای نقاط اوج در ۸ نیم‌سیکل نخست (MMSE)	۰/۰۱	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹	۰/۰۰۹
حداکثر خطای نقاط اوج در ۸ نیم‌سیکل نخست	۰/۳	۰/۳۲۱	۰/۳۲۱	۰/۳۲۱
خطای نقاط اوج در نیم‌سیکل نهم تا سیزدهم	۰/۱	۰/۱۰	۰/۱۳	۰/۰۳

الف-۳: یکی از ۴ بلوک تولیدکننده سطوح  $\pm 1V$ ،  $\pm 0.5V$  و  $\pm 0.25V$  (بلوک‌های با نماد C) از مدار خارج شده است. احتمال این حالت ۲۵٪ است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16 \pm 15$ ، دامنه‌های  $\pm 8 \pm 7$  و دامنه‌های  $\pm 4 \pm 3$  تغییر خواهند کرد.

چنانچه در هر یک از حالت‌های الف-۱ تا الف-۳ مشخصه‌های سیگنال لورن استخراج شود، درنهایت می‌توان شاخص OMOE را محاسبه نمود.

ب- PWM نه سطحی: دامنه‌های صفر،  $\pm 16$ ،  $\pm 8$ ،  $\pm 4$  و  $\pm 2$  توسط این آرایش تولید می‌شود. به این صورت که ۸ بلوک تولید  $\pm 1V$  (با نماد A)، چهار بلوک تولید سطوح  $\pm 1V$  و  $\pm 0.5V$  (با نماد B)، دو بلوک تولید سطوح  $\pm 1V$ ،  $\pm 0.5V$  و  $\pm 0.25V$  (با نماد C) و دو بلوک دیگر تولید سطوح  $\pm 1V$ ،  $\pm 0.5V$ ،  $\pm 0.25V$  و  $\pm 0.125V$  (با نماد D) را بر عهده دارند. اگر دامنه بهنجار خروجی هر بلوک به صورت واحد فرض شود، دامنه‌های صفر،  $\pm 16$ ،  $\pm 8$ ،  $\pm 4$  و  $\pm 2$  توسط این آرایش ایجاد می‌شود. بر این اساس چنانچه یکی از بلوک‌های مدار آسیب ببیند بسته به نقش آن حالت‌های خطای متصور، سیگنال خروجی



**جدول (۵):** سناریوهای خطا در حالت حذف ناخواسته دو بلوک برای آرایش PWM نه سطحی.

نماد بلوک	A	B	C	D
A	رخداد ۱ ٪۲۳،۳۳	رخداد ۲ ٪۲۶،۶۷	رخداد ۳ ٪۱۳،۳۳	رخداد ۴ ٪۱۳،۳۳
B	×	٪۵	رخداد ۵ ٪۶،۶۷	رخداد ۶ ٪۶،۶۷
C	×	×	رخداد ۸ ٪۰،۸۳	رخداد ۹ ٪۳،۳۳
D	×	×	×	رخداد ۱۰ ٪۰،۸۳

**جدول (۶):** سناریوهای خطا در حالت حذف ناخواسته دو بلوک برای آرایش PWM یازده سطحی.

نماد بلوک	A	B	C	D	E
A	رخداد ۱ ٪۲۳،۳۳	رخداد ۲ ٪۲۶،۶۷	رخداد ۳ ٪۱۳،۳۳	رخداد ۴ ٪۱۳،۳۳	رخداد ۵ ٪۱۳،۳۳
B	×	٪۵	رخداد ۶ ٪۶،۶۷	رخداد ۷ ٪۶،۶۷	رخداد ۸ ٪۶،۶۷
C	×	×	رخداد ۱۰ ٪۰،۸۳	رخداد ۱۱ ٪۳،۳۳	رخداد ۱۲ ٪۳،۳۳
D	×	×	×	رخداد ۱۳ ٪۰،۸۳	رخداد ۱۴ ٪۱۳،۳۳
E	×	×	×	×	رخداد ۱۵ ٪۱۳،۳۳

**ب- مدولاسیون دامنه:** با توجه به عملکرد متفاوت بلوک‌ها در این ساختار، مطابق با رابطه (۹) چنانچه دو بلوک حذف شود ۱۲۰ حالت متصور است که باید مورد بررسی قرار گیرد. در اینجا به با توجه به چینش بلوک‌ها و به دلیل نزدیک بودن نتایج شبیه‌سازی ۱۰٪ از حالت‌های خرابی دو بلوک بررسی و با استفاده از آن خطای این روش با تقریب نسبی به دست می‌آید.

$$\binom{q}{p} = \frac{q!}{(q-p)! \times p!} \Rightarrow \binom{16}{2} = \frac{16 \times 15 \times 14 \times 13 \times 12 \times 11 \times 10 \times 9 \times 8 \times 7 \times 6 \times 5 \times 4 \times 3 \times 2 \times 1}{2 \times 1} = 120 \quad (9)$$

در رابطه اخیر، ترکیب فاکتوریل بیانگر حالت‌های متصور برای دو انتخاب از بین ۱۶ بلوک است.

#### ۴-۶- استخراج OMOE

پس از تشریح سناریوها و استخراج مشخصه‌های سیگنال در هر یک از آن‌ها، با استفاده از روابط بیان شده MOE و OMOE قابل محاسبه است. در نهایت نتایج مطابق با آنچه در جدول (۷) آمده است قابل بیان می‌باشد.

**ج-۳:** یکی از ۲ بلوک تولیدکننده سطوح  $\pm 17V$ ،  $\pm 0.5V$  و  $\pm 25.5V$  از مدار خارج شده است. احتمال این حالت  $12.05\%$  است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16$  به  $\pm 15$ ، دامنه‌های  $\pm 8$  به  $\pm 7$  و دامنه‌های  $\pm 4$  به  $\pm 3$  تغییر خواهند کرد.

**ج-۴:** بلوک تولیدکننده سطوح  $\pm 17V$ ،  $\pm 0.5V$ ،  $\pm 25.5V$  و  $\pm 12.5V$  از مدار خارج شده است. احتمال این حالت  $6.25\%$  است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16$  به  $\pm 15$ ، دامنه‌های  $\pm 8$  به  $\pm 7$ ، دامنه‌های  $\pm 4$  به  $\pm 3$  و دامنه‌های  $\pm 2$  به  $\pm 1$  تغییر خواهند کرد.

**ج-۵:** بلوک تولیدکننده سطوح  $\pm 17V$ ،  $\pm 0.5V$ ،  $\pm 25.5V$  و  $\pm 12.5V$  از مدار خارج شده است. احتمال این حالت  $6.25\%$  است و در صورت وقوع آن دامنه‌های  $\pm 16$  به  $\pm 15$ ، دامنه‌های  $\pm 8$  به  $\pm 7$ ، دامنه‌های  $\pm 4$  به  $\pm 3$ ، دامنه‌های  $\pm 2$  به  $\pm 1$  و دامنه‌های  $\pm 1$  به صفر تغییر خواهند کرد.

**د- مدولاسیون دامنه:** هرچند چیدمان این آرایش به صورتی در نظر گرفته شده است که تا حد امکان زمان روشن بودن بلوک‌ها باهم برابر باشد ولی در این ساختار هیچ‌یک از بلوک‌های تقویت‌کننده عملکرد یکسانی را ندارند. بر این اساس برای لحاظ کردن سناریوهای حذف ناخواسته یک بلوک، باید شازده حالت در نظر گرفت که در هر یک از آن‌ها با حذف یکی از بلوک‌های  $A_1$  تا  $A_{16}$  سیگنال خروجی استخراج و تحلیل می‌گردد.

#### ۳-۶- سناریو سه: حذف ناخواسته دو بلوک

**الف- PWM هفت تا یازده سطحی:** در آرایش هفت سطحی چنانچه دو بلوک به‌طور ناخواسته حذف گردد حالت‌های رُخداد متصور شش سناریو است که چگونگی و احتمال وقوع آن مطابق با جدول (۴) قابل بیان است. همچنین جداول (۵) و (۶) رُخداد متصور و احتمال وقوع آن را در حالت‌های نه و یازده سطحی نشان می‌دهد.

**جدول (۴):** سناریوهای خطا در حالت حذف ناخواسته دو بلوک برای آرایش PWM هفت سطحی.

نماد بلوک	A	B	C
A	رخداد ۱ ٪۲۳،۳۳	رخداد ۲ ٪۲۶،۶۷	رخداد ۳ ٪۲۶،۶۷
B	×	٪۵	رخداد ۴ ٪۱۳،۳۳
C	×	×	رخداد ۶ ٪۵

[6] M. Wildemeersch, C. H. Slump, and A. Rabbachin, "Acquisition of GNSS signals in urban interference environment," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 50, no. 2, pp. 1078-1091, Apr. 2014.

[7] E. Axell, F. M. Eklöf, P. Johansson, M. Alexandersson, and D. M. Akos, "Jamming detection in GNSS receivers: Performance evaluation of field trials," *Navigation*, vol. 62, no. 1, pp. 73-82, 2015.

[8] B. Motella and L. L. Presti, "Methods of goodness of fit for GNSS interference detection," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 50, no. 3, pp. 1690-1700, Jul. 2014.

[9] M. Abdizadeh, J. T. Curran, and G. Lachapelle, "New decision variables for GNSS acquisition in the presence of CW interference," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 50, no. 4, pp. 2794-2806, Oct. 2014.

[10] C. G. Bartone and M. J. Narins, "H-field antenna considerations for eLoran aviation applications," Presented at IEEE/ION Plans, pp. 5-8, May 2008.

[11] M. Iad, "Characterization of atmospheric and precipitation static in the long range navigation band for aircraft," M.Sc. in Ohio University, 2004.

[12] A. Khorrami, A. Afifi, P. Amir, and T. Aghazade, "Design and fabrication of a Loran pulse based on PWM method for LPS navigation system," *Radar*, vol. 2, pp. 51-58, 2014. (In Persian)

[13] A. Khorrami, A. Afifi, M. H. Ghezelayagh, and A. R. Amin, "Extraction of optimum PWM levels in Loran switching transmitter for using in ground-based positioning system," *Adv. Defence Sci. & Tech.*, vol. 2, pp. 351-360, 2019. (In Persian)

[14] M. Bayat and M. H. Madani, "A new algorithm for synchronous continuous wave interference cancellation in Loran navigation system," *Adv. Electronic & Cyber Defense Sci. & Technol.* vol. 4, No. 2, pp. 23-38, 2016. (In Persian)

[15] M. Bayat and M. H. Madani, "Design and simulation of a linear adaptive system to remove the CWI in Loran navigation system receivers," *Adv. Defence Sci. & Technol.*, no. 4, pp. 267-277, 2018. (In Persian).

[16] C. A. Schue, "The next generation LF transmitter and its impact on Loran eLoran and tactical (e) Loran systems," *Proc. RIN NAV08 and 37th ILA Technical Symposium*, 2008.

[17] S. Kristen, G. Darren, S. Donald, B. Jay, and G. Jesse, "Design report littoral warfare submarine (SSLW)," Report of Advanced Tactics Littoral Alternative Submarine Ocean Engineering Design Project AOE4065/4066, 2005.

[18] Y. Movahedi, M. Dolatkhan, M. Karbasian, and V. Rasty, "Design and development of the pattern to assign and estimate the reliability of complicated systems by bayesian network method," *Journal of Industrial Engineering & Production Management*, vol. 24, no. 4, pp. 437-448, Jan. 2014. (In Persian)

[19] W. Xiong, Y. Li, and Q. Liang, "Loran-C synchronous interference suppression using improved adaptive algorithms," In *International Conf. on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, pp. 47-49, 2010.

[20] Z. Yinbing, J. Xu, T. Qiu, and G. Cui, "Synchronous carrier wave interference suppression based on accumulation and average in Loran-C," In *IEEE International Conf. on Electronic Measurement & Instruments*, pp. 2.50-2-54, 2009.

نتایج شبیه‌سازی‌ها در این جدول نشان می‌دهد آرایش PWM نه‌سطحی با میانگین OMOE به میزان ۰/۵۱ نسبت به سایر ساختارها از نظر قابلیت اطمینان ساختار مقاوم و بهینه‌تری دارد.

**جدول (۷):** نتایج شاخص اثربخشی برای هر یک از حالت‌های تولیدکننده سیگنال لورن.

میانگین OMOE	سناریو (تعداد بلوک حذف‌شده)			نوع آرایش	پهنای باند لورن
	دو	یک	صفر		
۰/۴۶۳	۰/۴۵۸	۰/۴۶۵	۰/۴۶۷	هفت‌سطحی	پهنای باند لورن
۰/۵۱۰	۰/۴۵۱	۰/۵۰۶	۰/۵۷۳	نه‌سطحی	
۰/۴۸۵	۰/۳۵۳	۰/۴۷۴	۰/۵۸۴	یازده‌سطحی	
۰/۴۵۵	۰/۳۹۱	۰/۴۴۴	۰/۵۳۰	مدولاسیون دامنه	

## ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از تبیین توپولوژی‌های طراحی مولد لورن مبتنی بر تقویت‌کننده‌های سوئیچینگ، نحوه عملکرد و چینش بلوک‌ها با شرط حفظ تعداد المان‌های بخش قدرت در هر یک از آن‌ها بیان گردید. در ادامه از میان روش‌های تحلیل قابلیت اطمینان، شاخص اثربخشی (OMOEO) برای تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتخاب شد و سناریوهای خطا برای چند توپولوژی مطرح گردید. در نهایت مشخص گردید آرایش PWM نه‌سطحی با شاخص OMOEO با میانگین ۰/۵۱، نسبت به PWM هفت و یازده سطحی و مدولاسیون دامنه از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است و از نظر عملکرد کارآمدتر و موفق‌تر خواهد بود. در ادامه پژوهش بررسی شاخص خطرپذیری و هزینه در انتخاب روش بهینه، استفاده از تکنیک‌های وزن‌دهی به مشخصه‌های سیگنال لورن و استفاده از شاخص OMOEO در ارزیابی قابلیت اطمینان سایر بخش‌های سامانه لورن پیشنهاد می‌شود.

## ۸- مراجع

[1] Volpe National Transportation Systems Center, Export Forum on Road Pricing and Travel Demand Modeling Proceedings, Washington DC, 2006.

[2] The Report of the President's Commission on Critical Infrastructure Protection, Washington DC, 1997.

[3] G. Johnson, R. Shalaev, R. Hartnett, P. Swaszek, and M. Narins, "Can loran meet GPS backup requirements?," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 20, no. 2, pp. 3-12, Feb. 2005.

[4] G. W. Johnson, "An evaluation of eLoran as a backup to GPS," *IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, pp. 95-100, May 2007.

[5] F. D. Nunes and F. M. G. Sousa, "GNSS blind interference detection based on fourth-order autocumulants," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 52, no. 5, pp. 2574-2586, Oct. 2016.

- [27] A. Helwig, G. Offermans, and C. Schue, "Low frequency (LF) solutions for alternative positioning, navigation, timing and data (APNT&D) and associated receiver technology," Proc. Int. Meeting (ITM), ION, pp. 166- 183, 2010.
- [28] M. Narins, "Alternative positioning, navigation, and timing initiative assumptions and requirements"; Proc. Int. Meeting. FAA APNT Public 2010, 41-49.
- [29] R. Billinton and R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques," 2nd ed., Plenum, 1992.
- [30] D. L. Grosh, A Primer of Reliability Theory, 1st ed., Wiley, 1989.
- [31] M. R. Mashirfar, "Model estimation and calculation of overall measure of effectiveness for ship," M.S. Thesis, Malek-Ashtar University of Technology, Iran, 2012. (In Persian)
- [32] E. Blasch, P. Valin, and E. Bosse, "Measures of effectiveness for high level fusion," Int. Conference on Information Fusion, 2010.
- [21] X. L. Xi , L. L. Zhou, J. S. Zhang, and J. F. Liu, "Combined IE-FDTD algorithm for long-range Loran-C ground-wave propagation," IEEE Antennas Propag., vol. 60, no. 8, pp. 3802– 3808, Aug. 2012.
- [22] P. Liatos and A. M. Hussein, "Characterization of noise in the lightning current derivative signals measured at the CN tower," IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility (EMC), vol. 47, no. 4, pp. 986-997, Nov. 2005.
- [23] C. B. Dean, "Automatic pulse sharpening with the AN/FPN-42 and AN/FPN-44A Loran-C transmitters," M.S. Thesis, Naval Postgraduate School, United States, 1992.
- [24] U.S. Coast Guard, "Specification of the transmitted Loran-C signal," U.S. Dept. of Transportation, Washington DC, 1981.
- [25] M. Bayat, M. H. Madani, "Loran phase code revisited for continuous wave interference cancellation"; IET Sci. Measurement & Tech., no.11, pp. 322-330, 2017.
- [26] H. Arthur, O. Gerard, S. Chris, and S. Charles, "Design and performance of a low frequency time and frequency dissemination service," Proc. Int. Meeting, FAA APNT Public, pp. 75-84, 2013.

---

## Reliability Analysis of Open-Loop Switching Loran Signal Generator Using Omoe Indicator

A. Khorami, A. Afifi\*, M. H. Ghezel Ayagh, A. R. Amin

\*Malek Ashtar University of Technology

(Received: 22/07/2019, Accepted: 28/06/2019)

### ABSTRACT

*There are various parameters for conceptual design of a LORAN transmitter based on multi-level pulse width modulation (PWM), such as structural arrangement of amplifiers and number of modulation levels. The parameters should be considered in different aspects, such as implementation possibility, realization of LORAN signal standards and reliability analysis. In this paper, the overall measure of effectiveness (OMOE) indicator is used to simulate the reliability results of various open-loop LORAN transmitters based on multi-level PWM. So, by selecting the basic parameters and determining the weight of each parameter, the target value and the minimum acceptable value of each parameter, based on LORAN standards, are determined and OMOE is derived for several scenarios. The results of simulations show that the nine-level PWM arrangement is the most reliable structure. The OMOE of this structure is equal to 0.573, 0.506 and 0.451 (with average of 0.510) for the three states of all-safe amplifier blocks, and one- and two- damaged blocks, respectively. The average of this indicator for the same states are equal to 0.455, 0.463 and 0.485 for pulse amplitude modulation, and seven- and eleven-levels PWM structures, respectively, which have smaller values relative to the optimum structure.*

**Keywords:** LORAN Transmitter, Multi-Level PWM, Reliability, Switching Amplifier, OMOE Indicator

---

\* Corresponding Author Email: afifi@mut.ac.ir