

طراحی مدار تعیین موقعیت بر مبنای آشکارساز نوری اثر جانبی به روش تاخیر زمانی و مقایسه آن با روش اختلاف ولتاژ

سعید علیائی^۱

علی بیدرنگ^۲

چکیده

استفاده از آشکارسازهای نوری چهار ربعی و اثر جانبی، دو روش مهم برای تعیین موقعیت یک جسم متحرک است. در این مقاله به طراحی و شبیه سازی مدار الکترونیک سامانه کنترل کننده و همچنین مقایسه روش جدید حالت تاخیر زمانی جریان بین الکترودها با حالت اختلاف ولتاژ بین الکترودهای آشکارسازهای حساس به موقعیت اثر جانبی پرداخته شده است. در این مقایسه چندین ویژگی مفید و منحصر به فرد از حالت تاخیردار نسبت به حالت اختلاف ولتاژ مشاهده می شود که از آن جمله می توان به خطی تر بودن پاسخ، مستقل بودن موقعیت از دامنه و فرکانس، تاثیر ناپذیری پاسخ از روشنایی پس زمینه و عدم نیاز بهنجارسازی سیگنال اشاره کرد. همچنین در این مقاله، حالت تاخیر زمانی و اختلاف ولتاژ بر روی چند نوع آشکارساز اثر جانبی عملی بررسی و مقایسه می شود.

کلید واژه

کنترل موقعیت، آشکارساز نوری اثر جانبی، تاخیر زمانی، تعیین موقعیت.

۱. استادیار برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، s_olyaee@srttu.edu

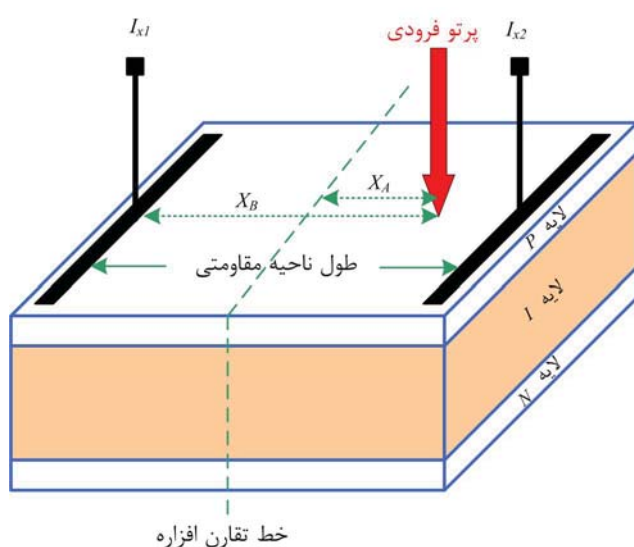
۲. کارشناس ارشدبرق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

تاریخ دریافت: ۹۰/۳/۱۵ تاریخ پذیرش: ۹۰/۵/۱۷

مقدمه

حسگرهای نوری چهار ربعی و اثر جانبی، به طور معمول در سامانه های ردیابی و رهگیری استفاده می شوند. نوع اثر جانبی برای اندازه گیری موقعیت در محیط هایی با سیگنال های پس زمینه مختلف کارایی لازم را دارد. حسگر موقعیت اثر جانبی شامل لایه مقاومتی یکنواختی است که بر یک طرف یا هر دو طرف زیرلایه نیم رسانا که دارای مقاومت ویژه بالایی است شکل می گیرد. در حالت یک بعدی، یک جفت الکتروود برای به دست آوردن سیگنال های موقعیت در دو انتهای لایه مقاومتی قرار دارد و در حالت دوبعدی، دو جفت الکتروود مقابل به هم در لبه های آشکارساز تعبیه می شوند. ناحیه فعال که همان لایه مقاومتی است، شامل یک پیوند PN است که بر اساس اثر فوتوولتایی، جریان نوری تولید میکند. زمانی که پیوند PN توسط یک لکه نور روشن می شود، مقداری انرژی نوری در طول هر یک از صفحات پیوند ذخیره می شود. حال اگر این پیوند تحت گرایش معکوس قرار گیرد، این انرژی نوری به صورت افقی به سمت الکتروودها که در کناره های پیوند تعبیه شده اند حرکت خواهند نمود. این پدیده، «اثر جانبی نور» نامیده می شود که نخستین بار توسط شاتکی در سال ۱۹۳۰ میلادی کشف شد [۱-۳]. البته در آن زمان توجه زیادی به این پدیده نشد؛ ولی در سال ۱۹۵۹ میلادی این پدیده دوباره توسط والمارک به طور عملی مورد استفاده قرار گرفت. اولین سامانه ردیاب مبتنی بر آشکارسازهای حسگر موقعیت در سال ۱۹۸۹ توسط گرسون و همکارانش پیشنهاد شد که در آن به کمک آشکارساز، یک سیگنال خطا تولید می شد و با استفاده از آن به تصحیح موقعیت می پرداختند. پدیده اثر جانبی نور از دیدگاه های مختلفی از قبیل هندسه و ساختار قطعه، ترکیب مواد به کار رفته در ساخت قطعه و همچنین نوع ساخت، توسط پژوهشگران مختلفی مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفته است. متداولترین هندسه های مورد توجه در این زمینه عبارتند از: یک وجهی، دو وجهی و پینکوشین. نورلانگ و میدل هوک، افرادی بودند که به طور عملی آشکارسازهای حسگر موقعیت نوع والمارک و دووجهی را ساختند [۲]. در ادامه کار آنها، رز و اشمیت این کار را برای انواع دیگر آشکارساز حسگر موقعیت اثر جانبی توسعه دادند و اورب جزئیات مداری و مدارات پردازش سیگنال مربوط به آشکارساز را به دست آورد.

از جمله کاربردهای این نوع از آشکارسازی تعیین موقعیت می توان به: سنجش مسافت، بینایی ماشین، میکروسکوپ نیروی اتمی، شکل دهی سطوح، رباتیک و ردیابی اشعه لیزر اشاره کرد. آشکارسازهای نوری تعیین موقعیت اثر جانبی، بهطور معمول برای کاربردهای صنعتی و نظامی مورد استفاده قرار میگیرند [۱۲-۴]. عمده محدودیت تعیین موقعیت با این نوع حسگر به نویز موجود در آنها و نیز اثرات غیرخطی قابل توجه آنها برمی گردد.



شکل (۱) نمای ساده از قسمتهای مختلف آشکارساز اثر جانبی. این ساختار برای حالت دو بعدی رسم شده است، اما برای سادگی، مختصات یک بعد در آن نشان داده شده است.

اصول عملکرد

وقتی یک لکه نور به سطح آشکارساز برخورد می کند، بار الکتریکی متناسب با شدت نور در محل برخورد تولید می شود. بار الکتریکی از لایه مقاومتی می گذرد و به عنوان جریان های نوری توسط الکترودها جمع آوری می شود (شکل ۱). بار الکتریکی، متناسب با عکس فاصله میان محل برخورد لکه نوری با هر الکترودها تقسیم می شود. اعمال بایاس معکوس کامل به آشکارساز اثر جانبی، ضخامت لایه تخلیه میان لایه های p و n را افزایش داده و جریان نفوذی قطعه را تا حد صفر کاهش می دهد و از بازترکیب سطحی نیز جلوگیری می نماید. به منظور توضیح بیشتر، چگونگی تقسیم جریان بین الکترودها در شکل ۲ نشان داده شده است. برای جریان I جاری از الکترودها S داریم [۳]:

$$I = I_0 \left(\frac{\sinh(a(L-S))}{\sinh(aL)} \right) \quad (1)$$

که I_0 کل جریان نوری تولید شده، L طول افزاره و a پارامتر تضعیف لوکوسکی و برابر است با:

$$a = \left(\frac{Q_n J_d q}{W_n K T} \right) \quad (2)$$

که در آن Q_n مقاومت ویژه ماده نوع J_d ، n چگالی جریان دیود، q بار الکتریکی، W_n ضخامت ماده نوع n ، k ثابت بولتزمن و T دمای مطلق است.

حامل های تولید شده به وسیله فوتونهای تابشی، بر اثر میدان پیوند از یکدیگر جدا می شوند و اثر فوتوولتایی موضعی تولید می کنند. جریان نوری حاصل که به زیرلایه دیود تزریق می شود برابر است با:

$$I_0 = P_d R_d \quad (3)$$

که P_d توان نور تک فام تابشی و R_d پاسخ دهی آشکارساز در طول موج معین است [۴]. رابطه میان موقعیت لکه نور تابشی بر سطح آشکارساز و جریان های نوری خروجی از کنتاکت ها (I_{x1} , I_{x2})، از روابطی که در ادامه داده شده است، پیروی می کند.

$$I_{x1} = \frac{\frac{L_x}{2} - X_A}{L_x} \times I_0 \quad (4)$$

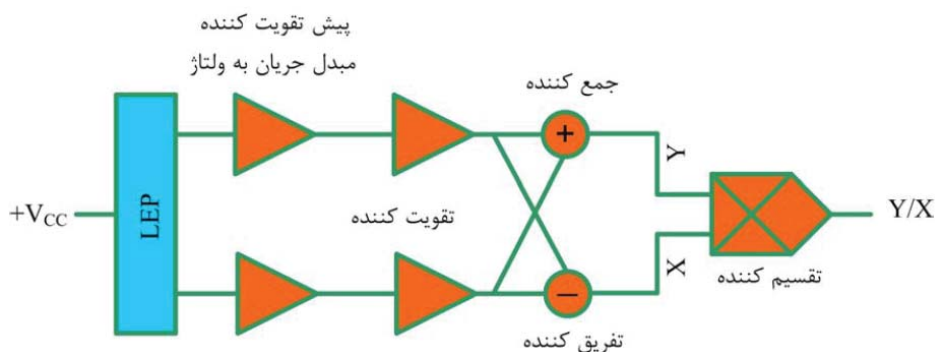
$$I_{x1} = \frac{\frac{L_x}{2} + X_A}{L_x} \times I_0 \quad (5)$$

در این رابطه طول مقاومت (طول ناحیه فعال) و فاصله میان مرکز آشکارساز و موقعیت لکه نور تابشی است. شکل ۲ بلوک دیاگرام مدار اولیه آشکارساز نوری اثر جانبی را نشان می دهد. برای زمانی که لبه آشکارساز به عنوان مبدا در نظر گرفته شود، داریم:

$$I_{x1} = \frac{L_x - X_B}{L_x} \times I_0 \quad (6)$$

$$I_{x2} = \frac{X_B}{L_x} \times I_0 \quad (7)$$

که در آن $I_o = I_{x_1} + I_{x_2}$ کل جریان نوری، I_{x_i} جریان خروجی از الکتروود X_i و X_B فاصله میان لبه آشکارساز و موقعیت لکه نور تابشی است.



شکل ۲) بلوک دیاگرام کلی مدار اولیه آشکارساز نوری اثر جانبی.

با مشخص شدن جریان های I_{x_1} و I_{x_2} ، موقعیت لکه نور با استفاده از روابط فوق و مستقل از شدت نور تابشی و تغییرات آن به دست می آید. موقعیت X این مدار آشکارساز اثر جانبی مطابق شکل ۴، با استفاده از نرم افزار Pspice تحلیل شده است که نتایج آن در بخش بعد خواهد آمد. مدار شکل ۴ نمی تواند پاسخگوی نیاز ما باشد، چراکه باید خروجی در مرکز آشکارساز به صفر میل کند. برای برطرف شدن این مشکل، هر سیگنال را به دو قسمت مثبت و منفی تقسیم کرده و هر قسمت را به طور جداگانه بررسی می کنیم. مدار اصلاح شده در شکل ۵ نشان داده شده است. خروجی این مدار نیز در شکل ۶ آمده است.

آماده سازی سیگنال در روش تاخیر زمانی

برای تبدیل اطلاعات مکانی موقعیت هدف، لازم است پرتو برگشتی توسط آشکارساز نوری اثر جانبی دریافت شود. مطابق شکل های ۳ و ۴، پس از برخورد پرتو با آشکارساز، جریان نوری به ولتاژ تبدیل شده و پس از تقویت کنندگی به یک مقایسه کننده می رود و سپس به سمت مدار تقسیم کننده هدایت می شود.

این مدار دارای پاسخ مطلوبی نیست؛ چراکه باید در خروجی یک سیگنال ثابت داشته باشیم که بیانگر مختصات لکه نوری تابیده شده بر سطح آشکارساز (X_A) باشد، در حالی که آی سی تقسیم کننده، سیگنال های ورودی را به صورت لحظه به لحظه بر هم تقسیم می کند. از آنجا که سیگنال های ورودی به مدار مجتمع تقسیم کننده، سیگنال های ثابت نیستند (زیرا نور تابیده شده بر سطح آشکارساز به

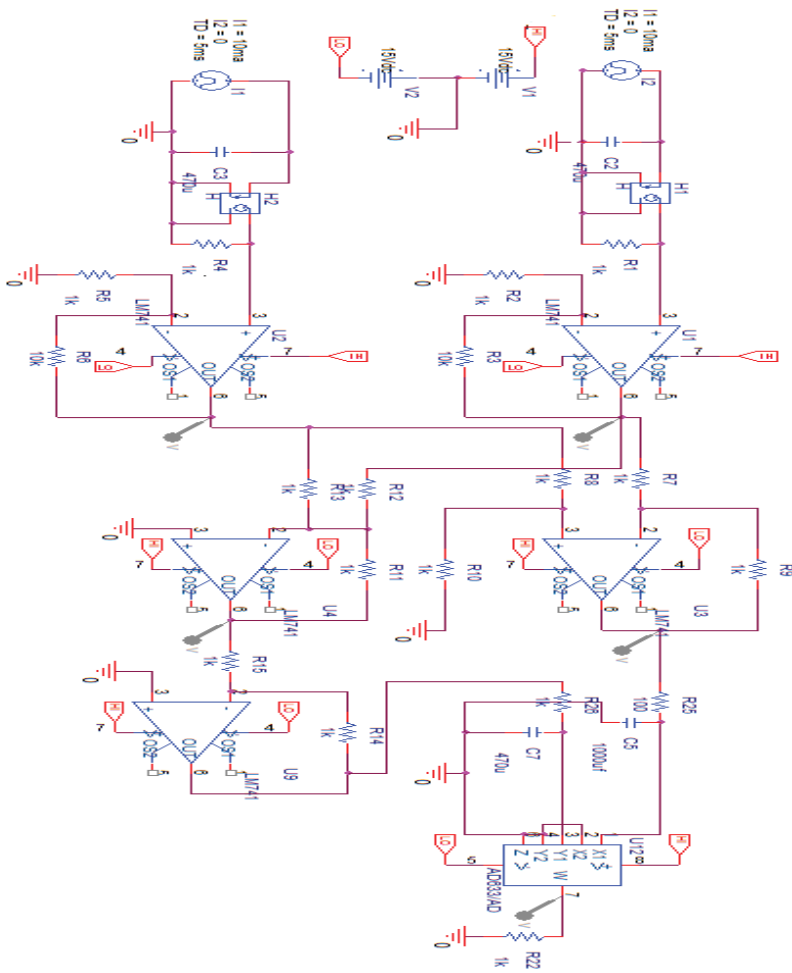
منظور تمیز دادن آن از روشنایی نور زمینه، با فرکانس چند کیلو تا چند مگاهرتز مدوله شده است)، در خروجی سیگنال های متغیر با زمان خواهیم داشت. برای برطرف شدن این مشکل نیاز به یک طبقه اضافی بعد از طبقات تفریق کننده و جمع کننده به منظور به دست آوردن دامنه متناسب با سیگنال های تفاضل و مجموع داریم. نتایج نشان می دهند که پاسخ آشکارساز حسگر موقعیت، با تغییر شدت نور تغییر می کند. در ادامه به بررسی پاسخ آشکارساز حسگر موقعیت اثر جانبی (LEP) با تغییر موقعیت لکه نور می پردازیم.

معادله آشکارسازی موقعیت یک بعدی، با توجه به شکل ۲ عبارتست از:

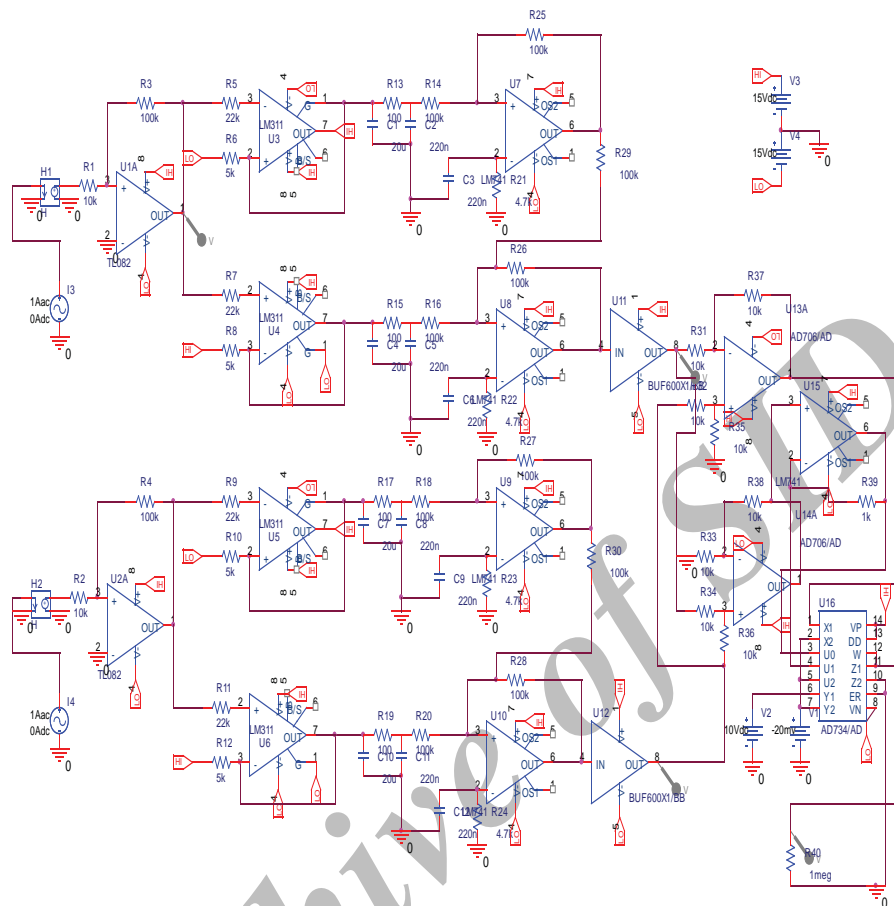
$$\Delta X = S_1 \frac{I_{x1} - I_{x2}}{I_{x1} + I_{x2}} \quad (8)$$

در رابطه فوق، و جریان های خروجی به دست آمده از الکترودها هستند. پس از به دست آوردن جریان ها، می توان آنها را به صورت اختلاف ولتاژ بین دو الکتروود در آورد:

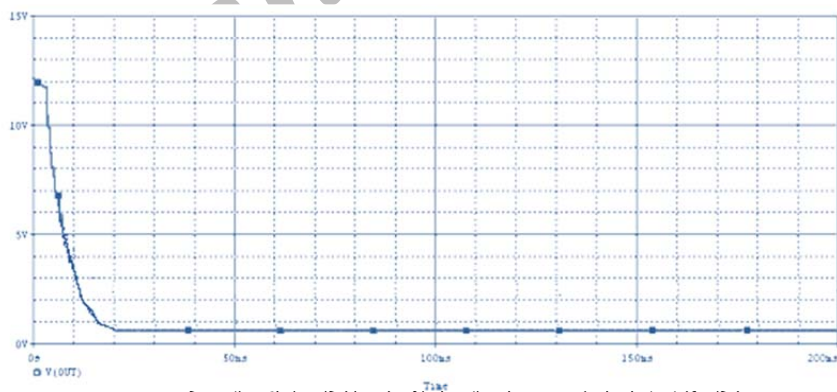
Archive of SID



شکل ۳) مدار جانبی آشکارساز اثر جانبی برای موقعیت X.



شکل (۴) مدار جانبی اصلاح شده آشکارساز اثر جانبی برای موقعیت X



شکل (۵) نمونه ای از خروجی مدار جانبی اصلاح شده آشکارساز اثر جانبی یک بعدی

$$\Delta X = S_1 \frac{V_{x_1} - V_{x_2}}{V_{x_1} + V_{x_2}} \quad (9)$$

همچنین می توان اختلاف تاخیر بین دو سیگنال را با استفاده از رابطه (۱۰) به دست آورد که در این رابطه Δt زمان تاخیر بین دو سیگنال است:

$$\Delta X = S_2 \Delta t \quad (10)$$

وقتی نقطه نوری روی سطح LEP برخورد می کند، یک توزیع حامل و یک شیب در غلظت حامل های اضافی ایجاد می شود. این نقطه نوری بدون هیچ میدان الکتریکی خارجی به روش گاوسی که توسط ضریب پخش و طول عمر بازترکیب القا می شود و به دلیل معکوس بودن LEP، به صورت جانبی یا عرضی، گسترش می یابد که اختلاف جریان به دست آمده را می توان به صورت اختلاف ولتاژ بین الکترودها جمع آوری کرد. در این روش تفاوت جریان منجر به حالت اختلاف ولتاژ می شود در حالی که تاخیر زمانی موجب اختلاف زمانی می شود که در این حالت پاسخ خطی تر می شود. برای شبیه سازی آشکارساز نوری اثر جانبی از معادله Lucovsky استفاده می کنیم [۶ و ۷]:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{J_s \rho_p}{W_p} \left[\exp\left(\frac{q_e V}{k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{\rho_p c}{W_p} \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{q_e \rho_p}{\omega_p} g(x, t) \quad (11)$$

در این رابطه v ولتاژ نوری آشکارساز، J_s چگالی جریان نیم رسانا، $c=C/A$ ، W_p ضخامت ناحیه ناخالص شده و مقاومت ناحیه فعال است. در بررسی سیگنال کوچک چون $q_e V \ll k_B T$ است میتوان از آن صرف نظر کرد که معادله به صورت رابطه (۱۲) به دست می آید [۸ و ۱۶-۱۳]:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} - \frac{\rho_p c}{\omega_p} \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{q_e \rho_p}{\omega_p} g(x, t) \quad (12)$$

با بهنجار کردن رابطه (۱۲) تا مقدار بیشینه توسط ثابت زمانی RC معادله به صورت رابطه (۱۳) حاصل می شود.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial^2 V_r}{\partial x^2} - \frac{R_{se}}{R_{sh}} V_r + g_r(x, t) \quad (13)$$

که در آن R_{se} مقاومت سری معادل، R_{sh} مقاومت شنت معادل، $\hat{x} = x/L$ و $\hat{t} = t/\tau$ است. همچنین در این رابطه، ولتاژ در LEP است که به ولتاژ V_{gm} بهنجار می شود. همچنین $V_r = \frac{V}{V_{Gn}}$ ولتاژ در LEP است که به ولتاژ V_{gm} بهنجار می شود. همچنین $g_r(\hat{x}, \hat{t}) = \frac{V_G(\hat{x}, \hat{t})}{V_{Gm}}$ توزیع جریان بهنجار شده را در سطح آشکارساز نشان می دهد [۳]. رابطه (۱۲) به طور کلی برای هر آشکارساز نوری اثر جانبی که دارای نسبت مشابه $\frac{R_{se}}{R_{sh}}$ باشد مناسب است. این معادله را می توان با یک معادله مشابه برای توزیع جریان به جای ولتاژ جایگزین کرد. برای این کار باید شرایط اولیه و مرزی زیر در معادله (۱۲) وجود داشته باشد.

$$V_r(\hat{x}, 0) = V_r(0, \hat{t}) = V_r(1, \hat{t}) = 0 \quad (14)$$

و برای جریان های نوری تولید شده در دو الکتروود داریم:

$$i_{r1,r2} = \frac{\partial V_r}{\partial \hat{x}} \Big|_{\hat{x}=0, \hat{x}=1} \quad (15)$$

با بسط سری فوریه و تبدیل آن به جریان می توان جریان های دو الکتروود را به صورت زیر به دست آورد:

$$i_{r1} = -I(\hat{x}_p) \sin(\omega \hat{t} + \varphi_1) \quad (16)$$

$$i_{r0} = I(1 - \hat{x}_p) \sin(\omega \hat{t} + \varphi_0) \quad (17)$$

موقعیت نقطه بهنجار شده برای طول آشکارساز \hat{x} و φ_0 و φ_1 تاخیر فاز هر سیگنال را نشان میدهد. با بسط سری فوریه پیرامون نقطه میانی، شیب منطقه خطی به صورت رابطه (۱۸) به دست می آید [۳]:

$$S_2 \approx \frac{\omega L}{2} \left\{ \frac{\cos h(\varepsilon_r) - \cos(\varepsilon_i)}{\varepsilon_r \sin(\varepsilon_i) - \varepsilon_i \sinh(\varepsilon_r)} \right\} \quad (18)$$

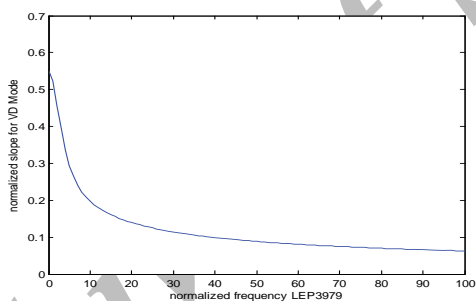
معادله (۱۸) نشان میدهد که S_2 از لحاظ خطی متناسب با فرکانس و طول آشکارساز است. برای شیب منطقه خطی در حالت اختلاف ولتاژ خواهیم داشت [۳]:

$$S_1 \approx L \left\{ \frac{\cosh(\varepsilon_i) - \cos(\varepsilon_r)}{\varepsilon_i \sin(\varepsilon_i) + \varepsilon_r \sinh(\varepsilon_r)} \right\} \quad (19)$$

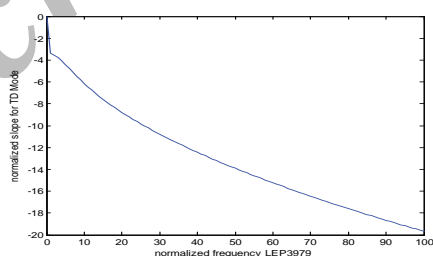
S_1 و S_p به ترتیب شیب حالت تاخیری و اختلاف ولتاژ هستند. با استفاده از این معادلات، امکان بررسی محدوده خطی بودن پاسخ خروجی آشکارساز نوری اثر جانبی قابل دستیابی است.

نتایج

مقایسه توابع حاصل از معادلات (۱۸) و (۱۹) در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل به راحتی می توان خطی بودن حالت تاخیری را نسبت به حالت اختلاف ولتاژ در فرکانس های مختلف مشاهده کرد. با داشتن مقادیر R_{sh} و R_{se} برای هر آشکارساز نوری می توان معادلات مربوطه را به کار برد. در این مقایسه وقتی نقطه نوری به یکی از پایه های آشکارساز نزدیک می شود، اختلاف ولتاژ کاهش می یابد. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می شود در یک بازه فرکانسی، حالت اختلاف زمانی خطی تر از حالت اختلاف ولتاژ بین دو الکتروود است.



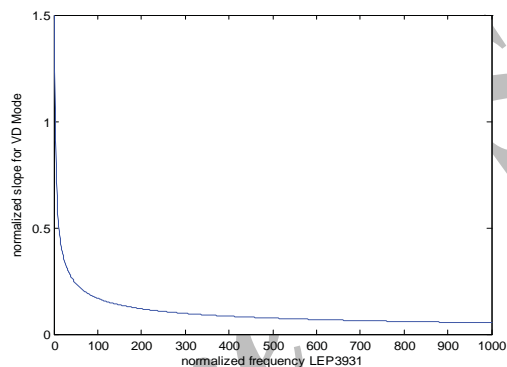
(الف)



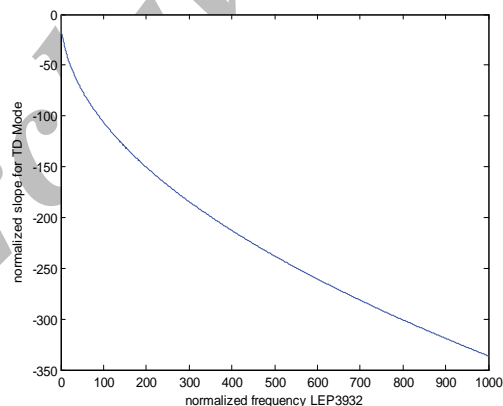
(ب)

شکل ۶) شیب بهنجار شده بر حسب فرکانس بهنجار شده برای (الف) حالت اختلاف ولتاژ (ب) حالت تاخیری در آشکارساز LEP3979

در این مقاله، به منظور تایید نتایج شبیه سازی، از چند نمونه آشکارساز نوری عملی استفاده شده است. برای این منظور سه نوع آشکارساز نوری اثر جانبی از شرکت Hamamatsu با شماره های LEP3931، LEP3932، و LEP3979 مورد مطالعه قرار گرفته اند [۱۷-۱۸]. شکل های ۷ و ۸ به ترتیب شیب بهنجار شده بر حسب فرکانس بهنجار شده را برای آشکارسازهای اثر جانبی LEP3931 و LEP3932 در دو حالت اختلاف ولتاژ و تاخیر زمانی نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، آشکارساز LEP3931 نسبت به آشکارساز LEP3979 در حالت اختلاف زمانی در محدوده وسیع تری از فرکانس خطی تر است



(الف)



(ب)

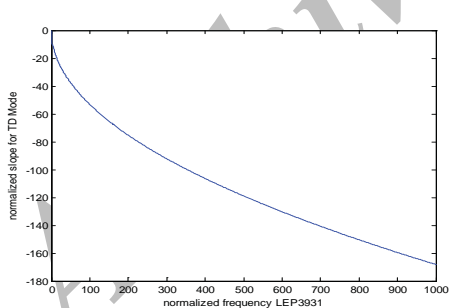
شکل ۷) شیب بهنجار شده بر حسب فرکانس بهنجار شده برای (الف) حالت اختلاف ولتاژ و (ب) حالت تاخیری در آشکارساز LEP3931.

شکل ۹ نمودار سه بعدی سیگنال های حالت اختلاف ولتاژ و حالت تاخیری را برای آشکارساز LEP3932 نشان می دهد. همان طور که از نمودارها دیده می شود با مقایسه این دو حالت، در حالت اختلاف ولتاژ، سیگنال در گوشه ها به اشباع می رود. همچنین مقدار خطا بر حسب موقعیت پرتو برای آشکارساز نوری LEP3937 در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

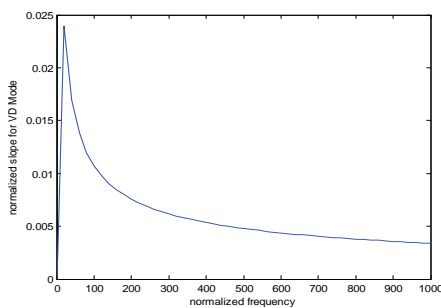
در جدول ۱ سه نوع آشکارساز عملی ساخت شرکت Hamamatsu [۱۸-۱۷] با یکدیگر از لحاظ تاخیر زمانی و اختلاف ولتاژ مقایسه شده که با توجه به نتایج به دست آمده حالت تاخیر زمانی از لحاظ خطی بودن، مناسب تر و دارای خطای کمتری است. با توجه به این جدول، LEP3931 دارای درصد خطای کمتر و در نتیجه خطی تر است.

جدول (۱) مقایسه سه نوع آشکارساز از لحاظ درصد خطا بین دو حالت تاخیر زمانی و اختلاف ولتاژ بین بازه فرکانسی بهنجار شده ۰ تا ۱۰۰۰

آشکارساز اثر جانبی	خطای تاخیر زمانی	خطای اختلاف ولتاژ
LEP3932	0.13 %	30 %
LEP3979	0.06 %	18 %
LEP3931	0.02 %	15 %

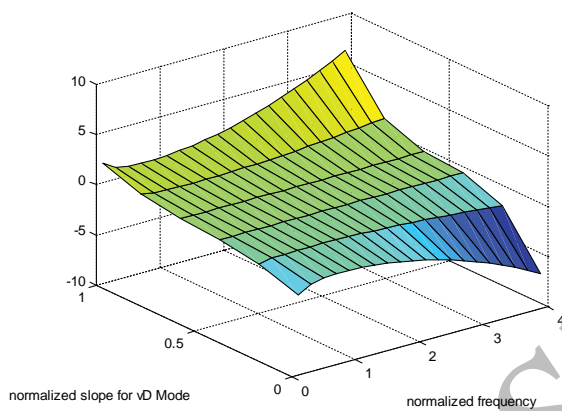


(ب)

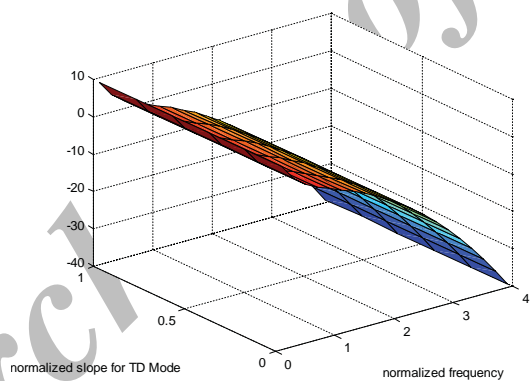


(الف)

شکل ۸) شیب هنجار شده بر حسب فرکانس بهنجار شده برای (الف) حالت اختلاف ولتاژ و (ب) حالت تاخیری در آشکارساز LEP3932.

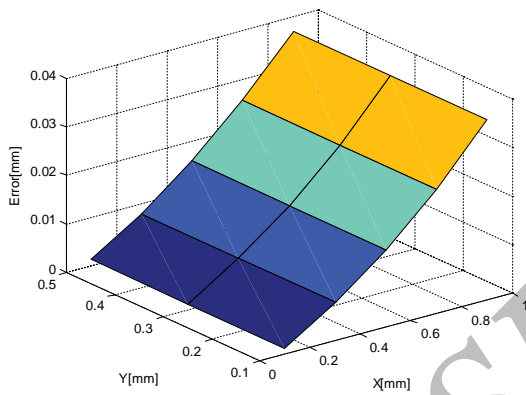


(الف)

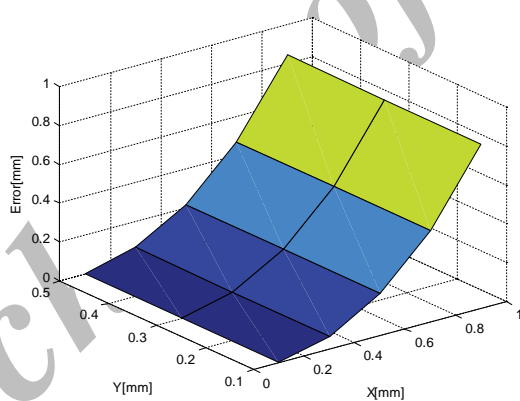


(ب)

شکل ۹) خروجی در دو حالت (الف) اختلاف ولتاژ و (ب) تاخیری برای آشکارساز LEP۳۹۳۲.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ خطا بر حسب موقعیت پرتو در دو حالت (الف) اختلاف ولتاژ و (ب) تاخیری برای آشکارساز LEP۳۹۳۷.

با توجه به نتایج به دست آمده حالت تاخیر زمانی نسبت به حالت اختلاف ولتاژ، دارای مزیت بیشتری است. همچنین با داشتن نسبت $\frac{R_{se}}{R_{sh}}$ هر آشکارساز اثر جانبی، می توان روابط حالت تاخیری و اختلاف ولتاژ را برای آن پیاده و نتیجه را با یکدیگر مقایسه کرد.

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی دو روش اندازه گیری اختلاف ولتاژ و اندازه گیری تاخیر زمانی برای آشکارسازی موقعیت با استفاده از آشکارسازهای نوری اثر جانبی پرداختیم. نتایج شبیه سازی برای این دو روش نشان داد که در حالت تاخیر زمانی، به نتایج خطی تری نسبت به روش متداول اختلاف ولتاژ می توان دست یافت. برای تایید نتایج از سه آشکارساز نوری اثر جانبی عملی ساخت شرکت هاماماتسو استفاده کردیم. با مدل سازی آشکارسازهای نوری اثر جانبی و استفاده از مقاومت های معادل آن، درجه خطی بودن برای هر آشکارساز نوری در دو حالت اختلاف ولتاژ و تاخیر زمانی به دست آمد. در حالی که برای حالت اختلاف ولتاژ، کمترین خطای غیر خطی به دست آمده برابر ۱۵٪ است، این مقدار برای اندازه گیری موقعیت با آشکارساز اثر جانبی در حالت تاخیر زمانی به ۰/۰۲٪ کاهش خواهد یافت.

مراجع

- [1] S. Olyaei, A. Bidrang, and M. Izadpanah, "Analysis of the Optimized Low-Nonlinearity Lateral Effect Sensing Detector", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 276, pp. 012140, 2011.
- [2] S. Kyle and R. Loser, "Automated Part Positioning With the Laser Tracker", Leica, 1998.
- [3] I. Abdulhalim, "Device Physics of the Time-Delay Mode of Operation of Optoelectronic Lateral Effect Position Sensors", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 37, pp. 1376-1384, 2004.
- [4] A. Makynen, "Position-Sensitive Devices and Sensor Systems for Optical Tracking and Displacement Sensing Applications", Department of Electrical and Informational Engineering, University of Oulu, Oct. 2000.
- [5] A. Makynen, T. Rahkonen, and J. Kostamovaara, "A Binary Photodetector Array for Position Sensing", Sensors and Actuators, Vol. 65, No. 1, 1998.
- [6] G. P. Petersson and L. Lindholm, "Position Sensitive Light Detectors With High Linearity", IEEE Journal of Solid State Circuits, Vol. sc-13, No.3, June 1998.

- [7] G. Lucovsky, "Photoeffects in Nonuniformly Irradiated p-n Junctions", J. Appl. Phys., Vol. 31, pp. 1088–1095, 1960.
- [8] Y. Shen, G. Xiang, Y. H. Liu, and K. Li. "Uncalibrated Visual Servoing of Planar Robots". Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 580-585, May 2002.
- [9] Duma Optronics LTD "Position Sensing and Alignment Engineering Guide", 2004.
- [10] D. Qian and W. Wang, "Position Measurements of Multiple Light Beams With One Position-Sensitive Detector (PSD)", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol.2, No.42, pp. 494-497, 1992.
- [11] Y. Meng and H. Zhuang, "Self-Calibration of Camera-Equipped Robot Manipulators", The International Journal of Robotics Research, Vol. 20, No. 11, pp. 909-921, 2001.
- [12] G. Nejat and B. Benhabib, "High-Precision Task-Space Sensing and Guidance for Autonomous Robot Localization", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1527-1532, 2003.
- [13] S. Olyaei and A. Bidrang, "Education of Position Sensing Detector Based on Simulation of Lateral Effect Photodetector", The Third National Conference on Education, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, (In Persian), pp. 160, 18-19 May 2011.
- [14] S. M. Nejad, S. Olyaei, N. Jouyandeh and M. Purmahyabadi "Modeling and Simulation of Lateral Effect Position-Sensitive Detector Responsivity to Optical Stimulators", American Journal of Applied Sciences, Vol. 8, No. 9, pp. 1781-1785, 2008.
- [15] W. Wang and I. Busch-Vishniac, "The Linearity and Sensitivity of Lateral Effect Position Sensitive Devices an Improved Geometry", IEEE Transaction on Electron