

آموزش نظری و تجربی جداسازی خطاهای غیرخطی در سامانه‌های اندازه‌گیری

سعید علیائی^۱ و سمانه حامدی^۲

چکیده: یکی از مباحث پیچیده در ساختارهای تداخل‌سنج هتروداین و هموداین و نیز روش آموزش آن، نحوه تشخیص تعداد دوره‌های سیگنال خطا در یک جابه‌جایی کامل است. با در نظر گرفتن نوع و تعداد عوامل تأثیرگذار بر خطاهای سامانه مورد نظر، ممکن است به ازای یک جابه‌جایی کامل، چند دوره مختلف در سیگنال خطا به وجود آید. در محیط آزمایشگاه، کلیه عوامل تأثیرگذار بر خطا وجود داشته و جداسازی آن‌ها از هم امکان‌پذیر نیست؛ از این‌رو، به منظور ایجاد درک مناسب برای کاربر، لازم است به صورت منفرد و سپس ترکیبی از عوامل ایجاد کننده خطا، دوره تناوب خطا مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. از سوی دیگر، ایجاد چیدمان مناسب از تداخل-سنجی هتروداین در محیط آزمایشگاه نیاز به آموزش عملی مدرس محور خواهد داشت تا بتوان دوره‌های مختلف ایجاد خطا را در آن بررسی کرد. در این مقاله با تشریح ساختارهای عملی ذکر شده، به نحوه آموزش در مشاهده خطای غیرخطی خواهیم پرداخت. این آموزش بر پایه محاسبات نظری و سپس مشاهدات عملی به صورت مدرس محور خواهد بود.

کلمات کلیدی: تداخل‌سنج لیزری، خطای غیرخطی، هموداین، هتروداین

۱ - مقدمه

مخابرات نوری، شبکه‌های نوری، کوانتوم و نانوفوتونیک یاد کرد.

تداخل‌سنج‌های لیزری و سامانه‌های اندازه‌گیری ابعاد در مقیاس نانو و کسر نانو از جمله این مباحث است. ساختارهای پیشرفته آن، مانند تداخل‌سنج چند مود، نیاز به چیدمان‌های دقیق داشته و آموزش آن به دلیل وجود پیچیدگی‌های فراوان نیازمند آموزش مدرس محور در محیط آزمایشگاه است. خطای موجود در تداخل‌سنج‌های هتروداین چند مودی، ناشی از پارامترهای مختلفی مانند قطبش نامناسب خروجی لیزر و نداشتن هم‌راستایی کافی در چیدمان آزمایشگاهی است. این پارامترها جمله‌ای در ساختار عملی و آزمایشگاهی وجود داشته و امکان بررسی اثر هر یک بر خطای نهایی وجود ندارد؛ از این‌رو برای آموزش فراگیر در خصوص نقش هر یک از این خطاها، باید تحلیل جامعی از این پارامترها داشت تا به صورت نرم‌افزاری قبل از اجرای آزمایش مورد بررسی قرار گیرند.

تداخل‌سنجی ترکیب دو یا چند موج است، به طوری که با بررسی موج حاصل از این ترکیب، بتوان اطلاعاتی در مورد موج‌های ورودی به دست آورد. اساس کار تداخل‌سنج‌ها بر

امروزه یکی از مهم‌ترین روش‌های یادگیری، آموزش هم زمان مباحث نظری، چه به صورت سنتی و چه به صورت مجازی، به همراه آموزش مهارت‌های عملی است. فن‌آوری‌های نوین از طرفی باعث بهبود در شیوه‌های آموزشی شده و از سوی دیگر پیچیدگی‌های مربوط به این نوع فن‌آوری‌ها باعث شده است آموزش خود این نوع از علوم و فن‌ها، با مشکلاتی مواجه شود.

بدون شک آموزش مباحثی که از پیچیدگی‌های فراوانی برخوردارند، به محیط‌های مناسبی برای تجربه و کسب مهارت نیازمندند. درک عمیق چنین مباحثی با یادگیری مهارت در ضمن یادگیری نظری آن میسر خواهد بود. یکی از محورهای نوین فن‌آوری را می‌توان در موضوعات گره خورده با نور یافت. علوم‌ی که می‌توان از آنها با عناوین فوتونیک، اپتیک، الکترونیک نوری و یا اپتوالکترونیک،

تاریخ دریافت مقاله ۸۹/۱۲/۱۱، تاریخ تصویب نهایی ۹۰/۰۳/۰۹

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، (نویسنده مسئول)، پست الکترونیکی: s_olyaee@srttu.edu

^۲ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

شرح داد؛ زیرا در صورت همدوس بودن منابع می‌توان اثر تداخل را مشاهده کرد. میدان الکتریکی یک موج صفحه‌ای همدوس با قطبش خطی با تغییرات زمانی سینوسی منتشره در جهت محور Z به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E = \text{Re} \{ a \exp [i2\pi\nu(t - z/c)] \} \quad (1)$$

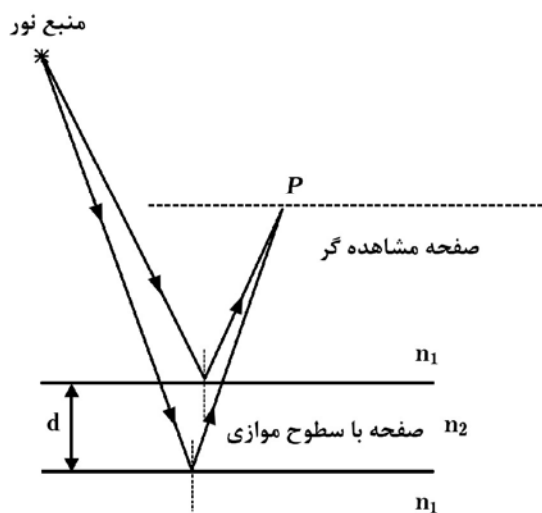
که در آن t زمان، ν فرکانس، Z بعد مکان و a دامنه موج است که به ازای آن‌ها خواهیم داشت:

$$E = A \exp(i2\pi\nu t) \quad (2)$$

$$A = \exp(-i\phi) \quad (3)$$

$$\phi = \frac{2\pi\nu z}{c} = \frac{2\pi m z}{\lambda} \quad (4)$$

در این رابطه، c سرعت نور در خلأ، n ضریب شکست محیط و λ طول موج منبع نور در خلأ است. با توجه به رابطه (۴) دیده می‌شود که مقدار فاز به دست آمده، به مقدار جابه‌جایی وابسته است که با آشکارسازی آن می‌توان مقدار مسافت را محاسبه کرد. با توجه به شکل (۱) اگر دو منبع نور همدوس در یک مسیر و با قطبش یکسان در نقطه P به هم برسند، منجر به روابط بالا می‌شود. بر اساس این روابط، اختلاف مسیر دو پرتو وابسته به اختلاف فاز می‌شود که برای اندازه‌گیری جابه‌جایی یا فاصله مناسب است.



شکل ۱ تداخل ناشی از دو منبع نور همدوس

پایه اصول تداخل نور است. از آنجا که آموزش عملی تداخل‌سنجی و عوامل ایجاد خطا در آن نیاز به چیدمان آزمایشگاهی بسیار دقیق و پایداری دارد، بهتر است به صورت نرم‌افزاری (با استفاده از نرم‌افزار MATLAB) مباحث و اصول اولیه آن به فراگیر آموزش داده شود، سپس مراحل آزمایش آن به صورت آموزش عملی مدرس محور به فراگیر منتقل گردد.

در سامانه‌های اندازه‌گیری، تداخل‌سنج لیزری یک سیستم متداول اندازه‌گیری در محدوده نانومتر است که با توسعه فن‌آوری نانو در نانوالکترونیک، نانو فوتونیک، نانومغناطیس، نانوسیستم‌های الکترومکانیکی^۱ و سیستم‌ها و مدارهای مجتمع با ابعاد نانو مانند پردازشگرها و گیت‌های منطقی استفاده می‌شود [۱-۳]. برای بهبود دقت اندازه‌گیری سامانه‌های اندازه‌گیری بر مبنای تداخل‌سنج‌های لیزری در حد کمتر از نانومتر، تحقیقات باید روی تخمین منابع خطا تمرکز داشته باشد.

همان‌طور که در ادامه این مقاله به آن پرداخته‌ایم، برای آشنایی دانشجویان با مفهوم خطا، ابتدا ساختار تداخل‌سنج‌های هموداین و هترودااین را در آزمایشگاه بسته و سیگنال‌های خروجی را مشاهده می‌کنند. در این بخش با مفهوم تداخل و تفاوت در آشکارسازی هموداین و هترودااین آشنا می‌شوند، سپس در هر کدام از ساختارها با توجه به شکل موج خروجی آشکارساز، به تشخیص و تفکیک خطاهای مرتبه اول و دوم پی می‌برند.

۲- روش شناسی پژوهش

۲-۱ اصول تداخل‌سنجی و نقش همدوسی

در یک چشمه نوری، نور از تعداد زیادی اتم گسیل می‌شود که هر اتم به مدت کسر نانو ثانیه نور گسیل می‌کند. حتی اگر شرایط گسیل نور اتم‌ها مشابه باشد، امواج مربوط به اتم‌های مختلف، اختلاف فاز متفاوتی خواهند داشت. پس پرتوهای خروجی از این دو منبع، فقط حدود نانو ثانیه ارتباط فازی ثابتی خواهند داشت. نورهای خروجی از دو منبع مختلف ارتباط ثابتی باهم ندارند و بنابراین نمی‌توانند نقش تداخلی ثابتی ایجاد کنند. اگر منابع نور همدوسی را داشته باشیم که با یکدیگر ارتباط فازی دارند، از طریق جمع امواج الکترومغناطیس نور می‌توان پدیده تداخل را

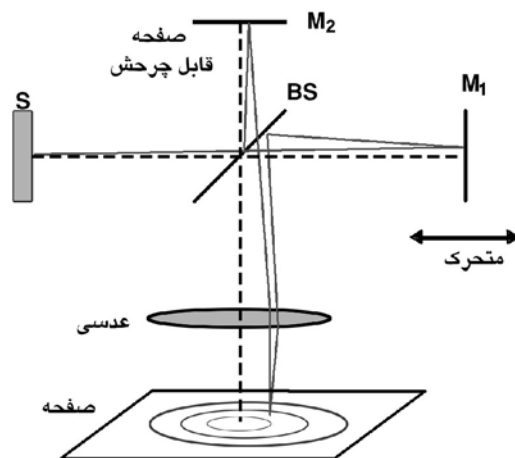
برد. آشکارسازی سیگنال تداخل، به دو دسته آشکارسازی هتروداين و هموداين تقسيم می‌شود.

آشکارسازی هموداين: اندازه‌گیری شدت نور پس از آمیختگی دو پرتو هم‌فرکانس به عنوان آشکارسازی هموداين شناخته می‌شود. در آشکارسازی هموداين شدت نور خروجی یک سیگنال DC است. این سیگنال به‌طور غیرمستقیم به جابه‌جایی فاز وابسته است [۵].

برای درک دانشجوین از چگونگی شکل یافتن فریزها در تداخل سنج هموداين، لازم است ساختاری مشابه شکل (۳) تنظیم شود. اغلب تداخل‌سنج‌های لیزری هموداين از یک منبع تک فرکانسی استفاده می‌کنند. منبع نور هموداين یک لیزر تک فرکانس است و در خروجی شامل یک تک قطبش ۴۵ درجه و پرتو قطبیده شده دایروی است. مطابق شکل (۳) پرتو نور توسط شکافنده پرتو به دو بخش مبنا و اندازه‌گیری تقسیم می‌شود و با بازتاب از هدف، پرتوها روی قطبیده خطی با هم ترکیب می‌شوند. برای مشاهده اثر تداخل، دو پرتو باید قطبش یکسان داشته باشند. برای این منظور از یک قطبنده خطی تحت زاویه ۴۵ درجه پس از شکافنده پرتو استفاده می‌شود. آشکارساز نوری تعداد فریز-ها در سیگنال تداخل را آشکارسازی می‌کند. اگر دو آینه در دو بازوی تداخل سنج بر هم عمود باشند و اختلاف مسیر نوری صفر باشد، مانند شکل (۴)، فریزها به شکل دایره هم مرکز با ضخامت یکسان دیده می‌شوند.

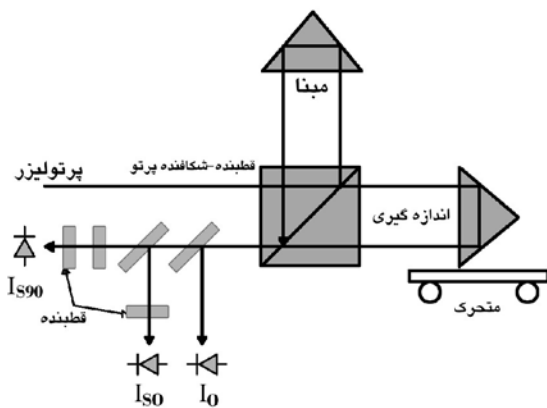
۲-۲ ساختار تداخل سنج مایکلسون

مهم‌ترین و رایج‌ترین تداخل‌سنجی که برای اندازه‌گیری جابه‌جایی با دقت زیاد استفاده می‌شود، تداخل‌سنج مایکلسون است که در سال ۱۸۸۱ برای اولین بار ارائه شد. تداخل‌سنج مایکلسون به طور وسیع در فن‌آوری ساخت ادوات نیم‌رسانا استفاده می‌شود. ادوات استفاده شده در این تداخل سنج با توجه به شکل (۲)، دو آینه M_1 و M_2 است که بازتابندگی زیادی دارند. تیغه شکافنده پرتو^۲ یا BS که سطح زیرین آن نیمه‌نقره اندود شده است، یک تقسیم کننده پرتو است؛ یعنی مقداری از باریکه فرودی را عبور داده و مقداری را بازتاب می‌دهد [۴].



شکل ۲ ساختار ساده یک تداخل سنج مایکلسون

منبع نور مورد استفاده، همدوس است که رایج‌ترین آن‌ها لیزر هلیوم-نئون می‌باشد. در تنظیم عادی تداخل‌سنج، آینه‌ها عمود بر یکدیگر قرار می‌گیرند و شکافنده پرتو در زاویه ۴۵ درجه نسبت به آنها قرار داده می‌شود. یکی از آینه‌ها ثابت است. مطابق شکل (۳) به‌طور معمول پرتو تک فام ورودی به وسیله یک سطح شکافنده به دو مسیر متفاوت تفکیک می‌شود. هرکدام از پرتوها در مسیر خود حرکت می‌کند و اختلاف مسافت پیموده شده توسط هر پرتو نور یک اختلاف فاز ایجاد می‌کند. اختلاف فاز آشکار شده خروجی الگوی تداخلی بین پرتوهای اولیه را شکل می‌دهد. با آشکارسازی اختلاف فاز ناشی از تداخل می‌توان به تشخیص مشخصات هر شیء در مسیر پرتوهای نور پی-



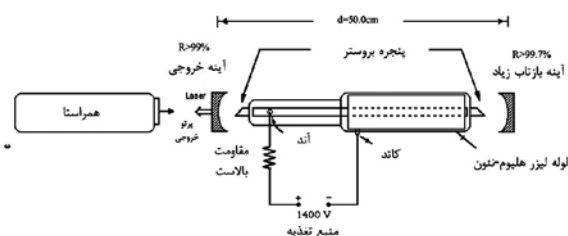
شکل ۳ مسیر پرتوهای نوری در تداخل‌سنج هموداين

به وسیله اندازه گیری تغییر فاز بین دو شدت نور I_r و I_m در بخش پردازش سیگنال جابه جایی به دست می آید [۱]:

$$\Delta Z = \frac{\Delta \phi \lambda_2}{4\pi n} \quad (8)$$

۲-۳ عملکرد لیزر هلیوم- نئون

لیزر هلیوم- نئون یک لیزر گازی کوچک است که کاربردهای صنعتی و علمی زیادی دارد و معمولاً از آن در آزمایشگاه های نوری استفاده می شود که شمای آن در شکل (۶) نشان داده شده است. طول موج معمول آن در $6328/8$ نانومتر طیف مرئی نور قرمز است. گاز میانی لیزر همان گونه که از نامش پیداست مخلوطی از گازهای هلیوم و نئون به نسبت $5:1$ تا $20:1$ در فشار پایین (به طور متوسط 50 پاسکال) در هر سانتی متر از طول کاواک در یک محفظه شیشه ای است [۶].



شکل ۶ شمای یک لیزر هلیوم- نئون

۲-۴ انواع خطا و منابع آن ها

همان طور که در مقدمه به آن اشاره شد، یکی از پیچیدگی های موجود در امر آموزش تداخل سنجی و خطاهای موجود در آن به فراگیر، نحوه تفکیک خطاهای مرتبه اول و دوم است. امروزه تداخل سنجی یک روش برای اندازه گیری جابه جایی با دقت بالا است. انواع مختلف تداخل سنج های مایکلسون مانند هترو داین و هموداین برای این کار استفاده می شوند. دسته بندی خطا به دو بخش اصلی خطی و غیرخطی بر اساس تأثیر و رابطه آن در سیگنال خروجی است. پایداری منبع لیزر، نوسان و تغییر دما و تلاطم هوا، منابع اصلی خطای خطی در تداخل سنج های نوری هستند. خطای خطی، خطایی است که نسبت به جابه جایی به طور خطی تغییر می کند؛ یا به عبارتی دارای شیب ثابت است. اگر تمام شرایط محیطی ایده آل فرض شود، محدودیت های کاربردی، نویز و خطاهای

آشکار سازی هترو داین: در آشکار سازی هترو داین، پرتو ورودی توسط یک انتقال فاز مدوله می شود. در این روش تداخل از فرکانس ثانویه استخراج می شود. سیگنال AC متناسب با فاز فرکانس ثانویه با دقت اندازه گیری می شود. یکی از مزایای این روش بهبود نسبت سیگنال به نویز است. ساختار تداخل سنج های هترو داین برای اندازه گیری فاز در شکل (۵) نشان داده شده است. منبع نوری که برای این تداخل سنج به کار می رود لیزر هلیوم- نئون دو مود با فرکانس های f_1 و f_2 است که دارای قطبش عمود برهم هستند [۱]. امواج خروجی لیزر به صورت زیر است که با عبور از شکافنده- قطبنده^۲ یکی از فرکانس ها به آینه ثابت و دیگری به آینه متحرک برخورد می کند.

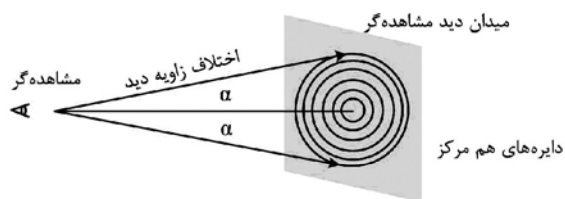
$$\bar{E}_1 = E_{01} \exp i(2\pi f_1 t + \phi_{01}) \quad (5)$$

$$E_2 = E_{02} \exp i(2\pi f_2 t + \phi_{02}) \quad (6)$$

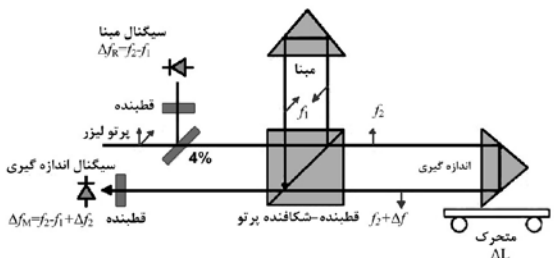
E_{01} و E_{02} دامنه موج و ϕ_{01} و ϕ_{02} فازهای اولیه میدان های الکتریکی موج هستند.

این تداخل سنج با فرکانس حامل $f_2 - f_1$ کار می کند؛ بنابراین تداخل سنج AC نام دارد. بازتاب گر متحرک در بازوی اندازه گیری با سرعت v حرکت می کند. اختلاف فاز آشکار سازی شده طبق رابطه (۷) به دست می آید:

$$\Delta \phi = \int_{t_1}^{t_2} 2\pi \Delta f dt = 2\pi \int_{t_1}^{t_2} \frac{2\nu n f_2}{c} dt = 4\pi \frac{n f_2}{c} \int_{t_1}^{t_2} v dt \quad (7)$$



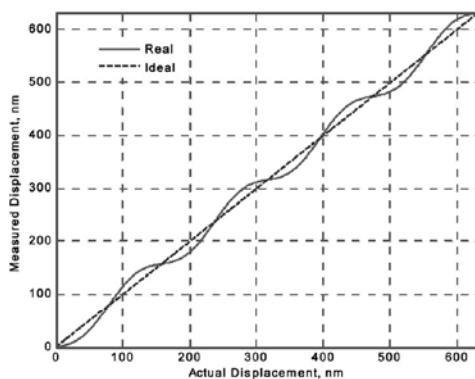
شکل ۴ فریزهای دایروی تداخل سنج مایکلسون



شکل ۵ مسیر پرتوهای نوری در تداخل سنج لیزری هترو داین

PM120 در محدوده ۵۰nW تا ۵۰mW در محدوده طیفی ۴۰۰nm تا ۱۱۰۰nm (مرئی و فروسرخ) عمل می‌کند [۱۶]. این دستگاه توانایی اندازه‌گیری توان‌هایی نوری با قابلیت تفکیک‌پذیری ۱۰۰pW را داراست. در واقع این دستگاه علاوه بر تجهیزات جانبی دارای دو بخش کلی کنسول و حسگر است. با تغییر حسگر آن توسط فراگیر و یا مدرس، این دستگاه قادر است توان‌هایی تا محدوده چند وات را نیز اندازه‌گیری کند. همچنین محدوده طول‌موجی PM120 بین ۴۰۰nm تا ۱۱۰۰nm است که امکان اندازه‌گیری طیف فرابنفش و فروسرخ دور نیز به شرط استفاده از حسگر مناسب آن وجود خواهد داشت. شکل ظاهری این توان سنج به همراه حسگرهای مختلف آن در شکل (۹) نشان داده شده است.

نحوه نمایش توان نهایی آشکارسازی شده روی صفحه نمایشگر می‌تواند توسط کاربر تنظیم شود. نمایش عددی توان، نمایش عقربه‌ای، نمایش گرافیکی، نمایش آماری و نمایش به‌صورت dBm روش‌های مختلفی هستند که امکان تنظیم آنها وجود دارد. شکل (۱۰) این نوع نمایش‌ها را نشان می‌دهند.



شکل ۷ جابه‌جایی اندازه‌گیری شده آمیخته با خطای انحراف متناوب بر حسب جابه‌جایی حقیقی

غیرخطی متناوب غالب خواهند بود. عوامل زیادی مانند آمیختگی فرکانسی و عمود نبودن پرتوهای لیزر و عوامل محیطی بر دقت تداخل‌سنج اثر می‌گذارند که این عوامل به نام خطاهای غیرخطی متناوب شناخته می‌شوند. این اثر در تداخل‌سنج‌های هتروداین بیشتر دیده می‌شوند (موضوعی که باید توسط فراگیر تحلیل و آزمایش شود). هنگامی که جابه‌جایی اندازه‌گیری شده با تداخل‌سنج، به‌زای جابه‌جایی حقیقی بازتاب‌گر متحرک رسم شود، یک نوسان حول خط مستقیم مشاهده می‌شود که مانند شکل (۷) انحراف متناوب نامیده می‌شود [۷-۱۴]. برای مشاهده خطای خطی و غیرخطی، فراگیر یا دانشجو از طریق شبیه‌سازی بهتر می‌تواند به این هدف برسد؛ زیرا ایده‌آل در نظر گرفتن شرایط در محیط کار و آزمایش، امکان‌پذیر نیست.

۲-۵ آموزش تجربی مدرس محور سامانه اندازه‌گیری

به منظور آموزش‌های مرتبط با تداخل‌سنجی نیاز به یک منبع همدوس مناسب است که شمای ظاهری لیزر هلیوم-نئون مربوط به آن در شکل (۸) نشان داده شده است. این لیزر گازی دارای توان موج پیوسته ۵mW با قطبش خطی در طول موج ۶۳۲/۸nm (نور قرمز) است [۱۵]. فاصله بین مودهای طولی آن از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\delta v = \frac{c}{2nL} \quad (9)$$

در این رابطه n ضریب شکست محیط، c سرعت نور در خلأ، L طول کاواک و δv اختلاف بسامدی بین دو مود مجاور است. ساختار کلی مود لیزری HRP050 به صورت مود پایه‌ای TEM₀₀ (بیش از ۹۹٪) بوده و واگرایی پرتو خروجی آن نیز بسیار کم است.

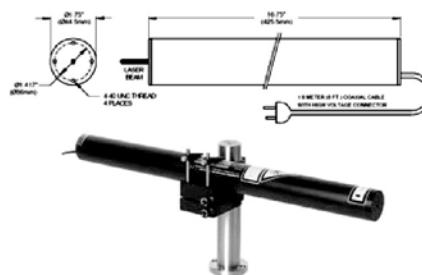
با توجه به تمهیدات در نظر گرفته شده برای این لیزر از جمله امکان چرخش و تنظیم پرتو آن، مدرس یا فراگیر می‌تواند به راحتی آن را با مجموعه اپتیکی هم‌راستا کند. در عمده فعالیت‌های آموزشی و پژوهشی لازم است، نتایج به‌دست آمده و یا اندازه‌گیری شده، مورد ارزیابی قرار گیرند. دستگاه‌های اندازه‌گیری و تست ایزاردقیق در این خصوص مفید هستند. یکی از مهم‌ترین کمیات مورد نظر، توان پرتو دریافتی توسط آشکارساز نوری است که برای اندازه‌گیری آن از توان‌سنج نوری استفاده می‌شود. توان‌سنج نوری

در نمایش عقربه‌ای توان اندازه‌گیری به صورت عقربه‌ای (البته دیجیتالی) خوانده می‌شود. در این حالت طول موج مرکزی بر روی 780nm تنظیم شده است و بیشینه توان قابل اندازه‌گیری (با توجه به تنظیم اولیه) برابر 10mW انتخاب شده است. البته در این حالت نیز مقدار دیجیتالی توان در پایین صفحه نمایش داده می‌شود. در نمایش گرافیکی می‌توان تغییرات توان نوری را در یک بازه زمانی مشاهده کرد. نرخ نمونه‌برداری از 6 نمونه در ثانیه تا 9 نمونه در دقیقه قابل تنظیم است. همچنین امکان ارزیابی سطح توان نوری در بازه زمانی 30 ثانیه تا 20 دقیقه وجود دارد. در نمایش آماری مقادیر لحظه‌ای، میانگین و انحراف معیار نشان داده می‌شوند. با نمایش گرافیکی می‌توان تغییرات توان نوری را در یک بازه زمانی مشاهده کرد. در این حالت نیز نرخ نمونه‌برداری از 6 نمونه در ثانیه تا 9 نمونه در دقیقه قابل تنظیم است. همچنین امکان ارزیابی سطح توان نوری در بازه زمانی 30 ثانیه تا 20 دقیقه وجود دارد. زمان شروع و اتمام اندازه‌گیری نیز توسط کاربر (فراگیر یا مدرس) قابل تنظیم است.

به منظور اجرای آموزش‌های مهارتی بخصوص آزمایش‌های مهارتی مدرس محور در حیطه آزمایش‌های دقیق اپتیکی و اپتوالکترونیکی مانند تداخل‌سنج‌های لیزری، وجود یک میز اپتیکی پایدار به همراه سایر متعلقات اپتومکانیکی آن ضروری است [17-21]. در واقع با توجه به پیچیدگی‌های فراوان و حساس بودن بخش‌های مختلف، لازم است چیدمان آزمایش توسط مدرس تهیه و توسط دانشجویان به‌طور مستقیم و یا به واسطه مدرس، طراحی و آزمایش شود.

میز اپتیکی نیوماتیکی 1x2 m به همراه پمپ و جک‌های بادی دارای صفحه مشبک با سوراخ‌های فلاویز در فاصله 25mm نسبت به یکدیگر است. با توجه به جک‌های بادی و پمپ آن، این میز از جهت مکانیکی دارای پایداری بسیار بالایی به منظور اجرای چیدمان‌های مناسب نوری است که در شکل (11) نشان داده شده است.

در بین ادوات اپتومکانیکی، بسیاری از آنها به منظور نگهداری و ثابت نگه داشتن ادوات اپتیکی طراحی و ساخته می‌شوند. به بیان دیگر همه ادوات اپتیکی به منظور قرارگیری در سامانه‌های اپتیکی و اپتوالکترونیکی نیاز به



شکل ۸ شمای ظاهری و نمایش ابعاد لیزر هلیوم-نئون مورد استفاده برای چیدمان آزمایشگاهی تداخل‌سنج لیزری [۱۵]



شکل ۹ شمای توان‌سنج نوری PM120 به همراه حسگرهای آن و شمای ظاهری و نمایش ابعاد حسگر S120B [۱۶]



شکل ۱۰ صفحه نمایشگر توان‌سنج نوری به صورت‌های عددی، عقربه‌ای، گرافیکی، آماری و dBm [۱۶]

۳- نتایج و بحث

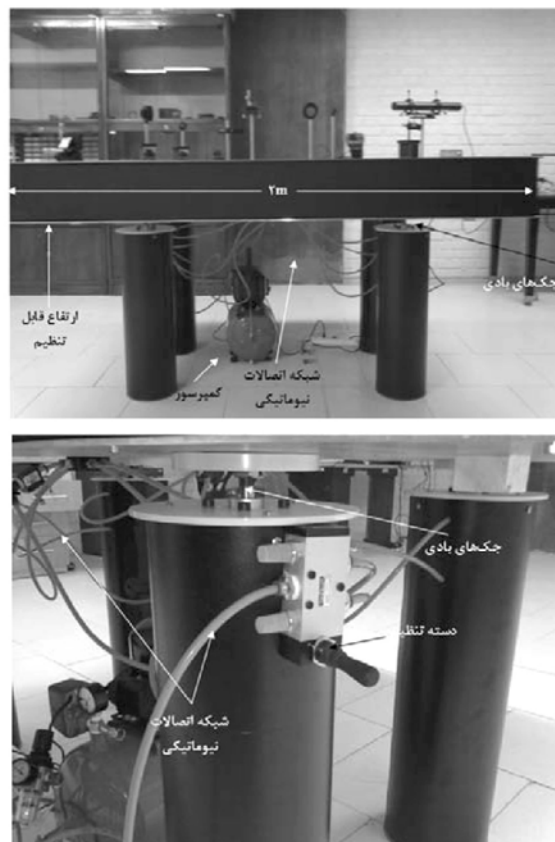
برای مشاهده اثرات متفاوت منابع خطا، دانشجویان به طور نظری و عملی می‌توانند با توجه به ساختار تداخل‌سنج هترودا این انواع متفاوت خطاها را به شرح زیر مشاهده کنند. با توجه به نتایجی که در این بخش به آن خواهیم رسید، امکان مشاهده یک، دو و یا چهار دوره خطا، در یک تناوب کامل و یا به بیان دیگر در جابه‌جایی هدف به اندازه یک طول موج کامل لیزر وجود دارد (در اینجا به دلیل استفاده از لیزر پایدار شده هلیوم- نئون این مقدار برابر 632.8 nm است). در صورت استفاده از لیزرهای سه مودی به جای نوع دو مودی، خطای غیرخطی تناوبی با هشت دوره تکرار نیز قابل مشاهده است [۲۲-۲۷].

بنابراین با توجه به انتخاب ساختار تداخل‌سنج توسط فراگیر (هموداین، هترودا این دو مودی و هترودا این سه مودی) و قرار دادن منابع مختلف خطا، می‌توان خطای غیرخطی نهایی را شبیه‌سازی کرد. در واقع با توجه به این- که امکان صفر کردن سایر منابع خطا در عمل وجود ندارد، روش شبیه‌سازی مؤثرترین روش برای مشاهده این نوع خطا خواهد بود.

فراگیران (دانشجویان) ابتدا باید اثرات متفاوت خطا را به صورت پارامتری تعریف کنند. بیضوی بودن پرتوهای لیزر به صورت $d\varepsilon_1$ و $d\varepsilon_2$ تعریف می‌شود. عمود نبودن پرتوهای لیزر و چرخش آن به شکافنده پرتو مربوط می‌شود که به صورت α و β مدل می‌شود. برای یک منبع لیزری دارای قطبش عمود بر هم $\alpha = -\beta$ و برای عمود نبودن آنها $\alpha \neq -\beta$ است. ضرایب انتقال شکافنده پرتو به صورت χ و ξ نمایش داده می‌شود. در نهایت زاویه چرخش قطبیده در مقایسه با محور ۴۵ درجه یا $\frac{\pi}{4}$ با θ مشخص می‌شود. با ترکیب رابطه‌ها و ساده‌سازی آنها در یک جمله، شدت جریان خروجی آشکارساز به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$I_{\text{mas}} = \sqrt{M^2 + N^2} \cos \left(2\pi(f_2 - f_1)t + (\phi_{02} - \phi_{01}) + \Delta\phi - \arctan\left(\frac{N}{M}\right) \right) \quad (10)$$

نگهدارنده‌های اپتومکانیکی دارند. از جمله می‌توان به لیزرها، فیلترهای نوری، آینه‌ها، منشورها، قطبنده‌های نوری، شکافنده‌های پرتو، شکافنده- قطبنده نوری و عدسی‌ها اشاره کرد. یکی از مهم‌ترین نگهدارنده‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها، نگهدارنده استوانه‌ای لیزر هلیوم- نئون است. با استفاده از پیچ‌های تنظیم پشت نگهدارنده، مدرس یا فراگیر می‌تواند زاویه لیزر را نسبت به راستای نگهدارنده تغییر دهد. در برخی از سامانه‌های اپتیکی از جمله تداخل‌سنج لیزری، لازم است جهت قطبش و یا زاویه عبور در راستای عمود بر سطح تابش تغییر کند. از جمله می‌توان به زاویه یک قطبنده خطی نسبت به جهت قطبش پرتو تابشی اشاره کرد. تداخل سازنده و یا مخرب بین دو پرتو نیز با توجه به جهت قطبش دو پرتو قابل بررسی و تحلیل است.



شکل ۱۱ شکل ظاهری میز اپتیکی نیوماتیکی به همراه نمایش جک‌ها و دسته بالا برنده برای آموزش‌های ابزار دقیق

$$\alpha = \beta = 0^\circ, \theta = 0$$

$$C1: d\varepsilon_1 = d\varepsilon_2 = 0^\circ, C2: d\varepsilon_1 = d\varepsilon_2 = 0.01^\circ,$$

$$C3: d\varepsilon_1 = d\varepsilon_2 = 0.02^\circ$$

$$C4: d\varepsilon_1 = d\varepsilon_2 = 0.03^\circ, C5: d\varepsilon_1 = d\varepsilon_2 = 0.04^\circ$$

شکل ۱۳ طیف خطای غیرخطی متناوب ناشی از بیضوی بودن پرتو لیزر ورودی

تنظیم اثر قطبش نامتعاد لیزر توسط فراگیر: نتایج نامتعاد بودن قطبش پرتوهای لیزر گسیل شده در شکل (۱۴) نشان داده شده است. با توجه به نمودار رسم شده، خطای متناوب مرتبه اول وابستگی خطی به عمود نبودن پرتوهای لیزر دارد [۱].

تنظیم اثر شکافنده و قطبنده پرتو توسط فراگیر: با استفاده از رابطه (۱۰) ترکیب منابع متفاوت غیرخطی را می‌توان مدل کرد. در شکل (۱۵) نتایج خطای غیرخطی برای زوایای متفاوت چرخش شکافنده پرتو و قطبنده رسم شده است در حالی که بقیه پارامترها ایده‌آل هستند.

تنظیم اثر چرخش قطبش توسط فراگیر: در شکل (۱۶) نتایج خطای غیرخطی برای منبع لیزر قطبیده بیضوی ترکیب شده با خطای تنظیم چرخش نشان داده شده است [۱۵].

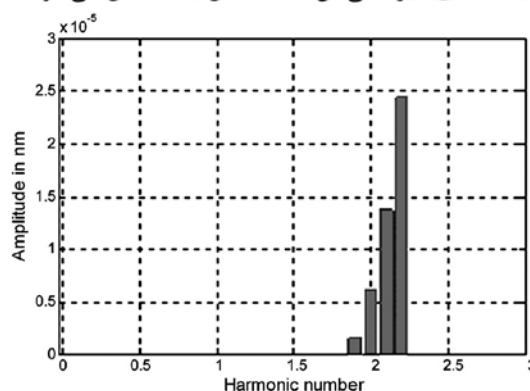
تنظیم اثر چرخش شکافنده پرتو توسط فراگیر: نتایج خطای غیر خطی برای منبع لیزر قطبیده بیضوی همراه با شکافنده پرتو دوران یافته، در شکل (۱۷) نشان داده شده است. دیده می‌شود که قطبش بیضوی منجر به افزایش خطای غیر-خطی مرتبه اول می‌شود. این اثر در شکل (۱۸) با نمایش تبدیل فوریه سیگنال‌ها واضح تر است [۲۵]. در این بخش فراگیر (دانشجو) با تأثیر هم‌زمان خطاهای مرتبه اول و دوم آشنا می‌شود.

با توجه با این‌که خطای غیرخطی اثر خود را در فاز نشان می‌دهد، فاز خروجی بسیار مهم است که با مشخص شدن پارامترهای M و N با استفاده از رابطه مربوطه داریم:

$$\Delta\phi_{nonlin} = -\arctan\left(\frac{A + B\sin(2\theta) + C\cos(2\theta)}{D + E\sin(2\theta) + F\cos(2\theta)}\right) \quad (11)$$

برای مشاهده اثر هرکدام از خطاها باید پارامتر مورد نظر را مقدار داده و بقیه پارامترها صفر در نظر گرفته شود. در ادامه به بررسی روش تنظیم پارامتر خطا توسط فراگیر در نرم‌افزار مربوطه می‌پردازیم.

تنظیم اثر قطبش بیضوی توسط فراگیر: اغلب وسایل نوری ایده‌آل نیستند، دو فرکانس تشعشع شده از لیزر قطبش بیضوی دارند که طیف خطای متناوب ناشی از آن در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در مورد دیگر اگر لیزر قطبیده، پرتو بیضوی با دوران برابر و هم‌جهت تشعشع کند نتایج طیف خطای غیرخطی آن مانند شکل (۱۳) مدل می‌شود.



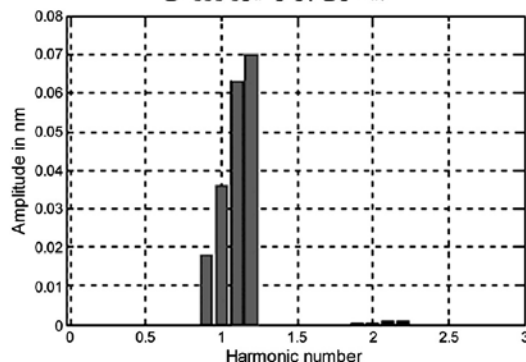
$$\alpha = \beta = 0^\circ, \theta = 0$$

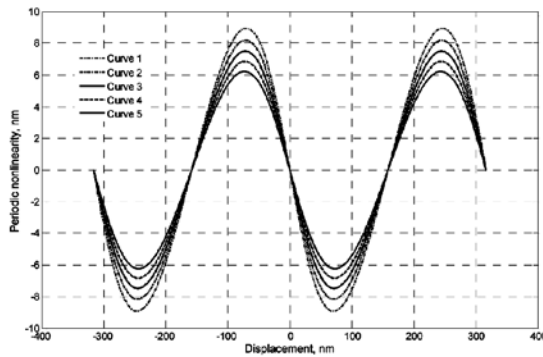
$$C1: d\varepsilon_1 = -d\varepsilon_2 = 0^\circ, C2: d\varepsilon_1 = -d\varepsilon_2 = 0.01^\circ,$$

$$C3: d\varepsilon_1 = -d\varepsilon_2 = 0.02^\circ$$

$$C4: d\varepsilon_1 = -d\varepsilon_2 = 0.03^\circ, C5: d\varepsilon_1 = -d\varepsilon_2 = 0.04^\circ$$

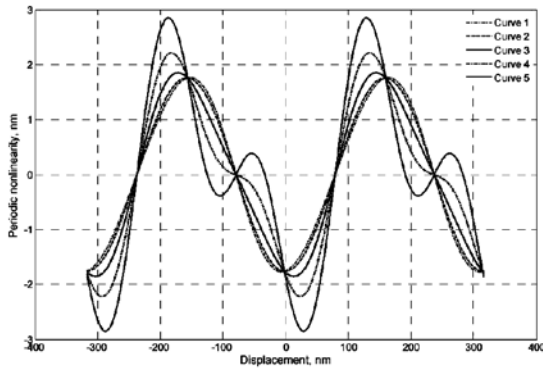
شکل ۱۲ طیف خطای غیرخطی متناوب ناشی از قطبش بیضوی پرتو لیزر ورودی





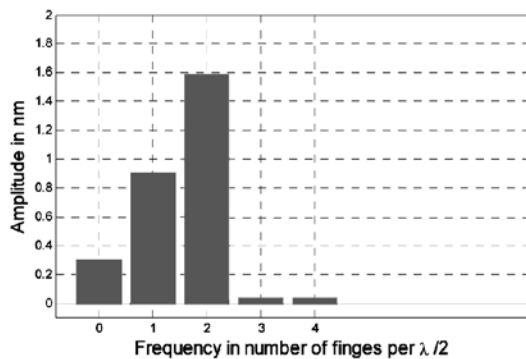
$\alpha = \beta = -10^\circ$
 $C1: \theta = 0^\circ, C2: \theta = -2.5^\circ, C3: \theta = -5^\circ$
 $C4: \theta = -7.5^\circ, C5: \theta = -10^\circ$

شکل ۱۶ نتایج اثر غیرخطی زوایای چرخش متفاوت قطبیده با زاویه ثابت عمود نبودن پرتوهای لیزر

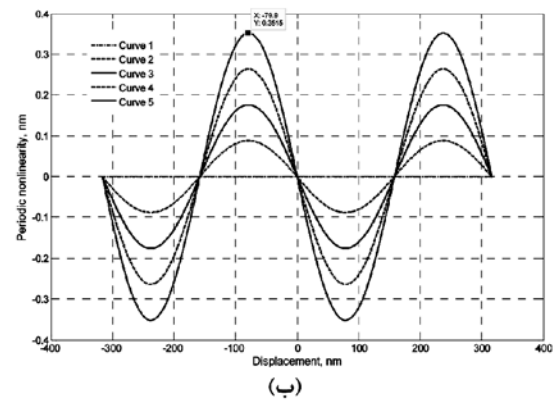
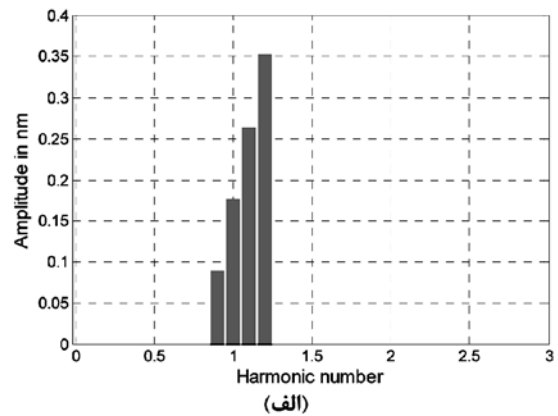


$d\varepsilon_1 = d\varepsilon_2 = 1^\circ, \theta = 0$
 $C1: \alpha = \beta = 0^\circ, C2: \alpha = \beta = 2.5^\circ, C3: \alpha = \beta = 5^\circ$
 $C4: \alpha = \beta = 7.5^\circ, C5: \alpha = \beta = 10^\circ$

شکل ۱۷ نتایج اثر غیرخطی به ازای زوایای متفاوت چرخش شکافنده پرتو با قطبش بیضوی منبع لیزر با تنظیم قطبیده ۴۵ درجه در مقایسه با قطبش لیزر

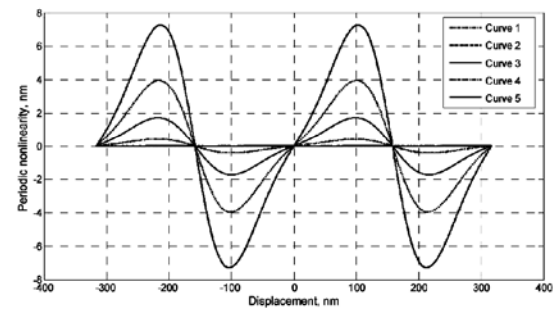


شکل ۱۸ طیف دامنه مقدار بیشینه سیگنال‌های شکل (۱۷)



$C1: \alpha - \beta = 0^\circ, C2: \alpha - \beta = 0.1^\circ, C3: \alpha - \beta = 0.3^\circ$
 $C4: \alpha - \beta = 0.4^\circ, C5: \alpha - \beta = 0.5^\circ$

شکل ۱۴ خطای غیرخطی ناشی از نامتعاد بودن پرتو $(d\eta)$. (الف) طیف خطای غیرخطی و (ب) دامنه خطای غیرخطی



$C1: \alpha = \theta = 0^\circ, C2: \alpha = \theta = 2.5^\circ, C3: \alpha = \theta = 5^\circ$
 $C4: \alpha = \theta = 7.5^\circ, C5: \alpha = \theta = 10^\circ$

شکل ۱۵ نتایج اثر غیرخطی زوایای چرخش متفاوت قطبیده با زاویه چرخش ثابت شکافنده پرتو $(\alpha = 10^\circ)$

۴- نتیجه گیری

در این مقاله به آموزش و بررسی انواع خطاهای ایجاد شده در تداخل سنج‌های لیزری بر پایه شبیه‌سازی به منظور تجزیه و تحلیل تأثیر هر عامل خطا توسط کاربر، پرداخته شد. سپس چیدمان آزمایشگاهی آن به صورت آموزش مدرس محور به همراه ملزومات مورد نیاز برای راه‌اندازی سامانه اندازه‌گیری جابه‌جایی مورد بررسی قرار گرفت. موارد مختلفی در مرتبه تکرار دوره خطای نهایی نقش داشتند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به قطبش بیضوی، عدم تعامد قطبش‌ها و هم‌راستا نبودن راستای ادوات و تجهیزات اپتیکی با راستای پرتو لیزر اشاره کرد.

در چیدمان آزمایشگاهی از لیزر هلیوم-نئون پایدار شده به همراه جداکننده، جداکننده-قطبنده، بازتاب‌گر و آشکارساز نوری استفاده می‌شود. با توجه به این‌که در محیط آزمایشگاهی و عملیاتی کلیه پارامترهای تأثیرگذار بر خطای مرتبه اول و دوم وجود دارد و امکان بررسی تأثیر تک‌تک آنها نیست، ابتدا با استفاده از شبیه‌ساز مناسب، فراگیر به بررسی هر یک از آنها می‌پردازد. دلیل این موضوع این است که امکان صفر کردن سایر منابع خطا در عمل وجود ندارد و در نتیجه روش شبیه‌سازی، مؤثرترین روش برای مشاهده این نوع خطا خواهد بود. سپس به صورت آزمایشگاهی و آموزش عملی مدرس محور، چیدمان آن برای انواع هموداین و هتروداین انجام می‌شود.

تعداد دوره خطای غیرخطی تناوبی در یک بازه از طول موج تعیین کننده مرتبه خطا خواهد بود. بنابراین فراگیر پس از اجرای برنامه شبیه‌ساز، با اندازه‌گیری مقادیر اوج، دامنه خطا را اندازه‌گیری می‌کند و با شمارش تکرار سیکل‌ها در بازه ۶۳۲ نانومتری (معادل با طول موج لیزر مورد استفاده)، به مرتبه خطای غیرخطی تناوبی دست می‌یابد.

پی‌نوشت

¹ Nano Electro Mechanical Systems: NEMS

² Beam Splitter: BS

³ Polarizer Beam Splitter: PBS

مراجع

- [1] Cosijns S.J.A.G., *Displacement laser interferometry with sub-nanometer uncertainty*, PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2004.
- [2] Schattenburg M.L. and Smith H.I., *The critical role of metrology in nanotechnology*, Proc. SPIE, Vol. 4608, 2001, pp.116-124.
- [3] The international roadmap for semiconductors 2008 edition metrology, Available at: <http://public.itrs.net>, 2008.
- [4] Hariharan P., *Optical Interferometer*, Elsevier Science, USA, 2003.
- [5] Wu Ch., *Periodic nonlinearity resulting from ghost reflections in heterodyne interferometry*, Optics Communications, Vol.215, 2003, pp.17-23.
- [6] Helium-Neon Laser, Available at: <http://Wikipedia,the free encyclopedia.html>, 2009.
- [7] Quenelle R.C., *Nonlinearity in interferometer measurements*, Hewlett-Packard, Vol.34, 1983, p.10.
- [8] Freitas J.M. and Player M.A., *Polarization effects in heterodyne interferometry*, Journal of modern optics, Vol.42, No.9, 1995, pp.1875-1900.
- [9] Bobroff N., *Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity*, applied optics, Vol.26, No.13, 1987, pp.2676-2682.
- [10] Rosenbluth A.E. and Bobroff N., *Optical sources of nonlinearity in heterodyne interferometers*, Precision Engineering, Vol.12, No.1, 1990, pp.7-11.
- [11] Hou W. and Wilkening G., *Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers*, Precision Engineering, Vol.14, 1992, pp.91-98.
- [12] Rosielle N., Schellekens P., Vermeulen M., Wetzels S. and Pril W., *Design for Precision: Current Status and Trends*, Precision Engineering, Vol.10, 1998, pp.446-448.
- [13] Demarest F.C., *High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics*, Measurement Science and Technology, Vol.9, 1998, pp.1024-1030.
- [14] Wu C., *Periodic nonlinearities resulting from ghost reflections in heterodyne interferometry*, Optics Communications, Vol.215, 2003, pp.17-23.

- [23] Olyae S. and Nejad S.M., *Nonlinearity and frequency-path modelling of three-longitudinal-mode nanometric displacement measurement system*, IET Optoelectronics, Vol.1, No.5, **2007**, pp.211-220.
- [24] Agilent Inc., *Optics and Laser Heads for Laser Interferometer Positioning Systems*, Available at: <http://www.agilent.com/find/assist>, **2009**.
- [25] Cosijns S.J.A.G., Haitjema H. and Schellekens P.H.J., *The influence of polarization states on non-linearities in laser interferometry*, In Proceedings of the 3rd Euspen International Conference, **2002**, pp.593-596.
- [۲۶] سمانه حامدی، طراحی و شبیه‌سازی سیستم اندازه‌گیری فواصل نانومتری مبتنی بر تداخل سنج لیزری هترودااین با کاهش اثرات غیرخطی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی، ۱۳۸۸.
- [27] Sirohi R.S., *A Course of experiment with He-Ne laser*, Optics and Laser Technology, Vol.18, **1986**.
- [15] Thorlabs Instrumentation, *Polarization Optics and Beam Splitters*, Available at: <http://www.thorlabs.com>, **2010**.
- [16] Thorlabs Instrumentation, *Optical Power Meter Systems*, PM120, Operational Manual, **2009**.
- [۱۷] دلبلیو آر میلر و ماری اف میلر، راهنمای تدریس در دانشگاه‌ها، ترجمه: میری ویدا، انتشارات سمت، ۱۳۸۳.
- [۱۸] گی آر لفرانسوا، نظریه‌های یادگیری انسان، ترجمه: سید محمدی یحیی، نشر روان، ۱۳۸۶.
- [19] Standa Inc., *Optomechanical Products*, Available at: <http://www.standa.com>, **2010**.
- [20] MEOS Inc., *Photonics for Engineers Mechanical Electronic Optical Systems*, MEOS GmbH, Available at: <http://www.meos.com>, Germany, **2009**.
- [21] Quimby R.S., *Photonics and Lasers: An Introduction*, John Wiley and Sons, **2006**.
- [22] Olyae S., Yoon T.H. and Hamedi S., *Jones matrix analysis of frequency mixing error in three-longitudinal-mode laser heterodyne interferometer*, IET Optoelectronics, Vol.3, No.5, **2009**, pp.215-224.