

بررسی تاثیر نويز آكوستيكي پرتوان فرکانس بالا بر عملکرد ژيروسكوپ ارتعاشي MEMS

در مقاله حاضر، تاثیر نويزهاي آكوستيكي پرتوان فرکانس بالا بر پاسخ ديناميكي و صحت سيگنال حسگري ژيروسكوپهاي ارتعاشي MEMS مورد بررسي قرار گرفته است. در ابتدا، با در نظر گرفتن چارچوب محافظ معادلات ديفرانسيل ديناميك سيستم با چهار درجه آزادي استخراج شده و به صورت معادلات حالت بازنويسي شده‌اند. در اين معادلات، اندرکنش امواج نويز آكوستيكي به شكل نيروي مكانيكي وارد شده به چارچوب محافظ ژيروسكوپ در نظر گرفته شده است. در ادامه، يك مدل سيمولنيك از ديناميك ژيروسكوپ ارتعاشي MEMS پياده‌سازي شده و سپس، اثر نويزهاي پرتوان فرکانس بالاي آكوستيكي هارمونيك و تصادفي بر عملکرد ژيروسكوپ مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنين، تأثير تغييرات پارامترهاي مختلفي مانند فرکانس نويز هارمونيك، سطح فشار صوتي و ضريب كيفيت ژيروسكوپ بررسي شده‌اند.

حسن محمدخاني^۱

استاديار

حماد كشاورزپور^۲

استاديار

واژه‌هاي راهنما: ميدان آكوستيكي، حسگرهاي ناوبري، امواج فرکانس بالا، ژيروسكوپ MEMS، نويز سفيد

۱- مقدمه

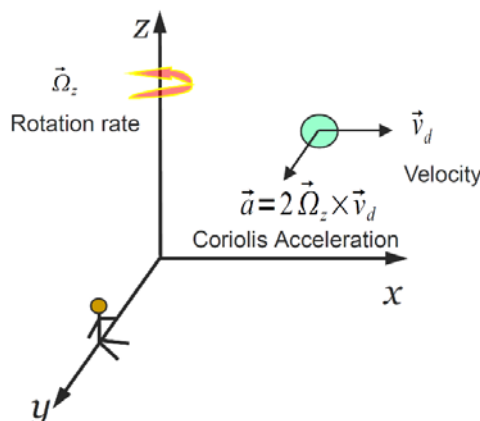
ژيروسكوپها وسيله‌اي هستند كه با استفاده از اثر كوريوليس، چرخش را اندازه‌گيري مي‌كنند. اثر كوريوليس شتاب ظاهري است كه يك جسم متحرك به نظر مي‌رسد نسبت به يك دستگاه مختصات در حال چرخش دارد. اين اثر در ژيروسكوپها اندازه‌گيري سرعت زاويه‌اي را ممكن مي‌سازد. در ژيروسكوپهاي MEMS از دو مود ارتعاشي بدین منظور استفاده مي‌شود. مود ارتعاشي اول، مود تحريك نام دارد و به جرم يا جرم‌هاي گواه (proof mass) در جهتي مشخص وارد مي‌شود. در صورت وجود سرعت زاويه‌اي، مود دوم ارتعاشي يا مود حسگر در سيستم به وجود مي‌آيد. اثر كوريوليس باعث حركت و ارتعاش جرم گواه در راستاي عمود بر مود اول خواهد شد. ژيروسكوپهاي MEMS به دليل اندازه كوچك، وزن كم، مصرف توان پايين و حساسيت بالا در كاربردهاي متنوعي از قبيل پايدارساز تصوير در دوربین‌هاي عكاسي و فيلم‌برداري، كنترل‌كننده‌ي پايداري خودرو، كنترل‌رلهاي بازي‌هاي ويدئويي، كنترل حركت ربات‌ها و سيستم‌هاي ناوبري اينرسیال (INS) استفاده مي‌شوند. در برخي از موارد از اين حسگرها در محيط‌هاي خشن با سطح نويز شديد بهره گرفته مي‌شود [۱].

^۱ نويسنده مسئول، استاديار، دانشكده فني و مهندسي، دانشگاه امام حسين (ع)، تهران hmohammadkhani@ihu.ac.ir

^۲ استاديار، گروه مهندسي مكانيك، دانشكده فني و مهندسي، واحد رشت، دانشگاه آزاد اسلامي، رشت، ايران

hemad.keshavarzpour@gmail.com

تاريخ دريافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۶، تاريخ پذيرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۹



شکل ۱- شتاب کریولیس

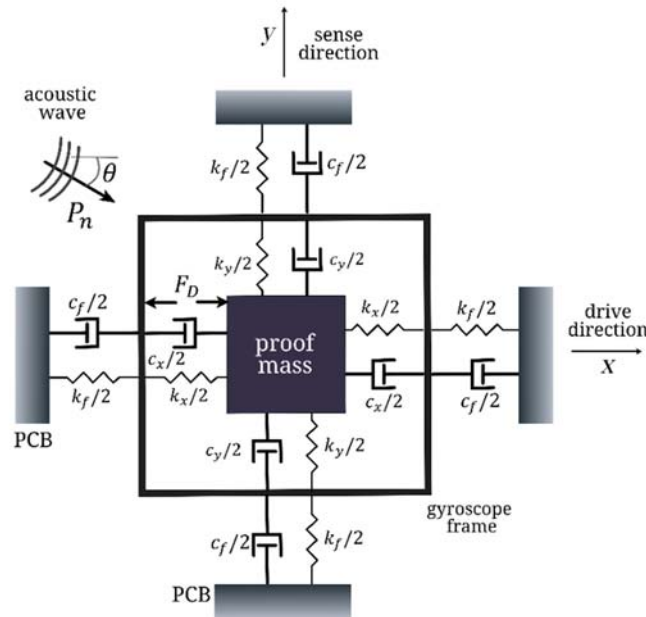
ارتعاشات فرکانس بالا، دماهای شدید، شوک‌های مکانیکی و نویزهای پرتوان آکوستیکی فرکانس بالا نمونه‌هایی از عواملی هستند که در محیط‌های خشن وجود دارند. اگر سطح نویز از حد مشخصی فراتر برود، با برخورد به ژيروسکوپ موجب ایجاد اختلال در عملکرد و از بین رفتن دقت و قابلیت اعتماد سیگنال خروجی دستگاه خواهد شد. این در حالی است که، دقت و قابلیت اعتماد اندازه‌گیری‌ها در کاربردهای حساس ناوبری از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. بنابراین، شناخت صحیح از مشخصات فیزیکی و دینامیکی ژيروسکوپ‌ها و درک چگونگی و میزان اثر نویزهای ارتعاشی توان بالا بر عملکرد آنها چه از طریق مطالعات نظری و چه آزمایش‌های تجربی حوزه‌ی پژوهشی با اهمیتی خواهد بود. در سال‌های اخیر، حساسیت ژيروسکوپ‌های MEMS نسبت به شوک‌های مکانیکی و ارتعاشات فرکانس بالا مورد توجه محققان قرار گرفته است [۲، ۳]. اگرچه، در برخی از محیط‌های خشن وجود نویزهای آکوستیکی توان بالا می‌تواند به شکل نامطلوبی بر عملکرد ژيروسکوپ‌ها اثرگذاری داشته باشند. وسایل هوانوردی مافوق صوت، ماشین‌هایی با نازل‌های فشار بالا و کاربردهای زیرسطحی از جمله‌ی این محیط‌های خشن آکوستیکی هستند. در چنین محیط‌هایی سطح نویز صوتی می‌تواند تا بیشتر از ۱۲۰ دسیبل و محدوده‌ی فرکانسی تا ۲۰ کیلوهرتز وجود داشته باشد. انرژی ارتعاشات و نویزها می‌توانند از طریق شاسی دستگاه و یا تماس با سیال محیط به اجزای داخلی ژيروسکوپ منتقل شوند. مولفه‌های فرکانسی که به فرکانس‌های طبیعی مکانیزم MEMS ژيروسکوپ نزدیک باشند می‌توانند حرکت ناخواسته در جرم گواه حسگر به وجود آورده، منجر به انحراف اندازه‌گیری نرخ زاویه‌ای شوند و یا سیگنال خروجی اشباع شده تولید کنند. در سال‌های گذشته مطالعاتی در زمینه‌ی اثرات ارتعاشات، شوک‌ها و دماهای شدید بر روی عملکرد ژيروسکوپ‌های MEMS صورت گرفته است [۴-۶]. در حالی که، تحقیقات محدودی درباره‌ی اثرات نویزهای آکوستیکی پرتوان انجام شده است. وینبرگ [۷] منابع ایجاد خطا در ژيروسکوپ‌های ارتعاشی را بررسی کرده است. وی روش ساخت و بسته‌بندی در خلا را روش موثری برای افزایش کیفیت عملکرد دستگاه و کاهش حساسیت نسبت به نویزهای خارجی معرفی کرد. دین و همکاران [۸] نشان دادند که ارتعاشات مکانیکی در فرکانس رزونانس ژيروسکوپ MEMS یا در حوالی آن فرکانس اثر مخربی بر روی سیگنال خروجی دارد. همچنین اثبات شد که این اثرات را می‌توان از طریق به‌کارگیری یک فیلتر پایین‌گذر مکانیکی به شکل معلق‌سازی دستگاه بین دو غشای لاستیکی یا ماده‌ی نرم دیگر علاوه بر ایجاد فیلتر پایین‌گذر الکترونیکی در

بورد مدار چاپی (PCB) آن کاهش داد. در مطالعه‌ای دیگر، ایشان استفاده از عملگرهای الکترواستاتیک را به عنوان یک فیلتر فعال با ضرایب فنریت و استهلاک متغیر پیشنهاد کرده‌اند [۹]. در عمل، نشان داده شده است که نویز آکوستیکی پرتوان پهن‌بند بر ژيروسکوپ‌های MEMS اثرگذار است [۱۰]. این مطالعه به صورت آزمایشگاهی بر روی چهار مدل ژيروسکوپ تجاری ADXR300، SiRRS01، QDARS و Tokin انجام شده است. مشاهده شده است که با نویزهای در سطح 100 dB کف نویز در ژيروسکوپ‌ها افزایش پیدا کرده در حالی که با رسیدن سطح نویز به 130 dB دیگر هیچ کدام از ژيروسکوپ‌ها داده‌های قابل اعتماد و قابل استفاده تولید نمی‌کنند. در ادامه، کاسترو [۱۱] یک واحد اندازه‌گیری اینرسیال شامل چندین ژيروسکوپ MEMS را در یک تونل باد قرار داد. در این پژوهش نشان داده شد که عایق کردن دستگاه به وسیله‌ی فوم‌های مختلف می‌تواند نویز وارد شده را کاهش دهد و از تخریب کامل داده‌های خروجی جلوگیری کند.

در این مقاله، یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی ژيروسکوپ‌های ارتعاشی MEMS تحت اثر نویزهای ارتعاشی و صوتی توان بالا توسعه داده می‌شود. با استفاده از این مدل، چگونگی و میزان اثر نویزهای آکوستیکی بر ژيروسکوپ‌های MEMS مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مدل و نتایج حاصل از آن می‌تواند بررسی و سنجش توسعه‌ی استراتژی‌های کاهش اثرات مخرب نویزها را تسهیل نماید.

۲- مدل دینامیکی ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS

یک ژيروسکوپ ارتعاشی (شکل ۲) از یک جرم گواه داخلی m_p که به چارچوب ژيروسکوپ از طریق یک مکانیزم تعلیق متصل است تشکیل شده است. این مکانیزم تعلیق را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از فنرها، k_x و k_y ، و مستهلک‌کننده‌ها، c_x و c_y ، در راستاهای عمود بر هم در صفحه‌ی $x - y$ در نظر گرفت. x_p و y_p به ترتیب جابه‌جایی جرم گواه در راستای x و y هستند. به علاوه، مکانیزم تعلیق به‌گونه‌ای است که مانع از چرخش جرم گواه نسبت به چارچوب ژيروسکوپ خواهد شد. در هنگام عملکرد، جرم گواه به وسیله‌ی نیروی محرک الکترواستاتیک هارمونیک F_D در راستای تحریک x به لرزش در می‌آید؛ این نیروی تحریک به وسیله‌ی یک جفت عملگر محرک شانه‌ای (comb drive) که در دو سمت جرم گواه قرار دارند به وجود می‌آید. هنگامی که ژيروسکوپ با سرعت زاویه‌ای Ω حول محور عمود بر صفحه‌ی z شروع به چرخش کند، یک نیروی هارمونیک کوریولیس به جرم گواه در راستای حسگری y القا شده و در نتیجه، این نیرو باعث ارتعاش جرم گواه در این راستا می‌شود. این حرکت توسط مکانیزم حسگرهای خازنی اندازه‌گیری شده و یک سیگنال ولتاژ خروجی متناسب با نرخ چرخش تولید می‌کند. در اینجا، به منظور شبیه‌سازی اثرات نویز و ارتعاشات خارجی وارد شده به سیستم ژيروسکوپ، چارچوب و سازه‌ی خارجی ژيروسکوپ با جرم m_f در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند با دو درجه آزادی x_f و y_f در صفحه‌ی ژيروسکوپ ارتعاش کند. به دلیل آن که شانه‌های محرک که نیروی الکترواستاتیک F_D را به جرم گواه وارد می‌کنند به این چارچوب متصل هستند، نیروی عکس‌عملی خلاف جهت و برابر با نیروی محرک الکترواستاتیکی به چارچوب وارد می‌شود. در عمل، سازه‌ی ژيروسکوپ به یک بورد مدار چاپی (PCB) متصل است که با سرعت زاویه‌ای ثابت (یا با تغییرات زمانی بسیار کوچک) Ω چرخش می‌کند. فنریت و استهلاک بین سازه و PCB به ترتیب k_f و c_f هستند. نیروی خارجی F_{η} نمایان‌گر نیروی اغتشاش خارجی نامطلوب وارد شده به ژيروسکوپ می‌باشد.



شکل ۲- ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS

۲-۱- معادلات حرکت

برای استخراج معادلات دینامیکی ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS می‌توان از روش لاگرانژ استفاده کرد:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial V}{\partial q_j} + \frac{\partial R}{\partial \dot{q}_j} = Q_j, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

که در آن T انرژی جنبشی، V انرژی پتانسیل، R تابع اتلاف رایلی هستند. همچنین، Q_j نیروهای تعمیم‌یافته و q_j مختصات تعمیم‌یافته نام دارند. N برابر با تعداد درجات آزادی سیستم خواهد بود. با توجه به مختصات نشان داده شده در شکل (۲) می‌توان انرژی جنبشی کل سیستم را به صورت زیر به دست آورد:

$$T = T_f + T_p \quad (2)$$

عبارت‌های T_p و T_f به ترتیب انرژی جنبشی چارچوب و جرم گواه هستند. اگر I_p و I_f به ترتیب گشتاور دوم لختی چارچوب و جرم گواه باشند، آن‌گاه عبارت‌های انرژی جنبشی به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$T_p = \frac{1}{2} m_p \dot{x}_p^2 + \frac{1}{2} m_p \dot{y}_p^2 + \frac{1}{2} m_p \Omega^2 (x_p^2 + y_p^2) - m_p \Omega \dot{x}_p y_p + m_p \Omega x_p \dot{y}_p + \frac{1}{2} I_p \Omega^2 \quad (3)$$

$$T_f = \frac{1}{2} m_f \dot{x}_f^2 + \frac{1}{2} m_f \dot{y}_f^2 + \frac{1}{2} m_f \Omega^2 (x_f^2 + y_f^2) - m_f \Omega \dot{x}_f y_f + m_f \Omega x_f \dot{y}_f + \frac{1}{2} I_f \Omega^2$$

به علاوه، انرژی پتانسیل عبارت است از:

$$V = \frac{1}{2} k_x (x_p - x_f)^2 + \frac{1}{2} k_x (y_p - y_f)^2 + \frac{1}{2} k_f x_f^2 + \frac{1}{2} k_f y_f^2 \quad (4)$$

همچنین،

$$R = \frac{1}{2} c_x (\dot{x}_p - \dot{x}_f)^2 + \frac{1}{2} c_y (\dot{y}_p - \dot{y}_f)^2 + \frac{1}{2} c_f \dot{x}_f^2 + \frac{1}{2} c_f \dot{y}_f^2 \quad (5)$$

با توجه به درجات آزادی سیستم ژيروسکوپ نشان داده شده در شکل (۲)، نیروهای تعمیم‌یافته Q_j و مختصات تعمیم‌یافته q_j را می‌توان در عبارت کار مجازی δW زیر تشخیص داد

$$\delta W = \sum_{j=1}^4 Q_j \delta q_j = (F_n^x(t) - F_D(t)) \delta x_f + F_D(t) \delta x_p + F_n^y(t) \delta y_f \quad (۶)$$

در رابطه (۶) نیروی نویز بر اساس زاویه‌ی برخورد به مولفه‌های عمودی F_n^y و افقی F_n^x تجزیه شده است. به طور معمول، نیروی محرک هارمونیک الکترواستاتیک به گونه‌ای تنظیم می‌شود که بر فرکانس طبیعی جرم گواه منطبق باشد و بیشترین حساسیت و بهره‌ی پاسخ به دست آید. در نتیجه، $F_D(t) = F_D \sin \omega_n t$. حال با جاگذاری رابطه‌های (۳) تا (۵) در (۱) و بهره‌گیری از (۶)، معادلات حرکت سیستم ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS به شکل زیر به دست می‌آیند

$$\begin{aligned} m_f \ddot{x}_f + c_x(\dot{x}_f - \dot{x}_p) + c_f \dot{x}_f + k_x(x_f - x_p) + k_f x_f - 2m_f \Omega \dot{y}_f - m_f \Omega^2 x_f &= F_n^x(t) - F_D(t) \\ m_p \ddot{x}_p + c_x(\dot{x}_p - \dot{x}_f) + k_x(x_p - x_f) - 2m_p \Omega \dot{y}_p - m_p \Omega^2 x_p &= F_D(t) \\ m_f \ddot{y}_f + c_y(\dot{y}_f - \dot{y}_p) + c_f \dot{y}_f + k_y(y_f - y_p) + k_f y_f + 2m_f \Omega \dot{x}_f - m_f \Omega^2 y_f &= F_n^y(t) \\ m_p \ddot{y}_p + c_y(\dot{y}_p - \dot{y}_f) + k_y(y_p - y_f) + 2m_p \Omega \dot{x}_p - m_p \Omega^2 y_p &= 0 \end{aligned} \quad (۷)$$

۲-۲- معادلات فضای حالت

معادلات دینامیکی حرکت (۷) را می‌توان به شکل معادلات فضای حالت به فرم زیر بازنویسی کرد:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (۸)$$

که بردار حالت X به صورت زیر تعریف می‌شود

$$X = \{x_f \quad \dot{x}_f \quad x_p \quad \dot{x}_p \quad y_f \quad \dot{y}_f \quad y_p \quad \dot{y}_p\}^T$$

همچنین، ماتریس‌های حالت A ، ورودی B و خروجی C را می‌توان به شکل زیر نوشت

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \Omega^2 - \frac{(k_x+k_f)}{m_f} & -\frac{(c_x+c_f)}{m_f} & \frac{k_x}{m_f} & \frac{c_x}{m_f} & 0 & 2\Omega & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\Omega \\ \frac{k_x}{m_p} & \frac{c_x}{m_p} & \Omega^2 - \frac{k_x}{m_f} & -\frac{c_x}{m_p} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Omega^2 - \frac{(k_y+k_f)}{m_f} & -\frac{(c_x+c_f)}{m_f} & \frac{k_y}{m_f} & \frac{c_y}{m_f} & 0 \\ 0 & -2\Omega & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_y}{m_p} & \frac{c_y}{m_p} & \Omega^2 - \frac{k_y}{m_p} & -\frac{c_y}{m_p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\Omega & \frac{k_y}{m_p} & \frac{c_y}{m_p} & \Omega^2 - \frac{k_y}{m_p} & -\frac{c_y}{m_p} & 0 \end{bmatrix}$$

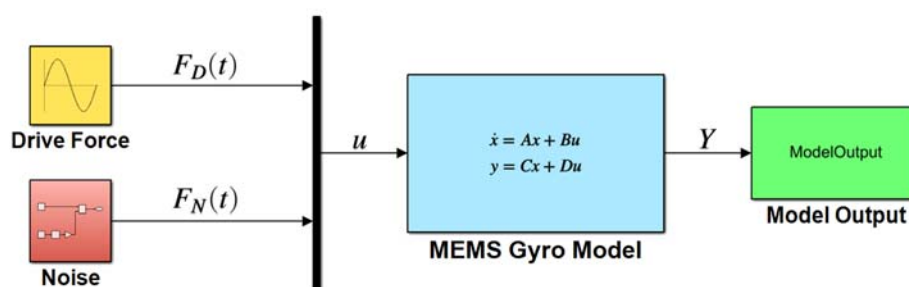
$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{m_f} & \frac{\cos \theta}{m_f} \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{m_p} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sin \theta}{m_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$u = \{F_D(t) \quad F_n(t)\}^T$$

در اینجا ماتریس C به نحوی تعریف شده است تا سرعت‌های جرم گواه و چارچوب به شکل خروجی از حل معادلات حاصل شوند. به علاوه، θ زاویه‌ی برخورد موج نویز به چارچوب ژيروسکوپ است. با پیاده‌سازی و حل معادلات فضای حالت (۸) در نرم‌افزارهای شبیه‌سازی می‌توان پاسخ دینامیکی یک ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS در مقابل نیروهای اغتشاشی خارجی اعم از مکانیکی یا آکوستیکی را شبیه‌سازی کرد.

۲-۳- پیاده‌سازی مدل دینامیکی

به منظور حل معادلات مدل ریاضی و انجام شبیه‌سازی‌های مختلف، معادلات حالت (۸) در نرم‌افزار سیمولینک (SIMULINK) پیاده‌سازی شده‌اند. شکل (۳) مدل پیاده‌سازی شده را نشان می‌دهد. معادلات (۸) به صورت بلوک فضای حالت پیوسته مدل شده در حالی که نیروی محرک F_D یک بلوک موج سینوسی جاگذاری شده است. نویز هم بر اساس نوع بررسی، یک بلوک موج هارمونیک یا بلوک تولید نویز سفید گاوسی خواهد بود.



State Space Model of MEMS Vibratory Gyroscope

شکل ۳- مدل ژيروسکوپ پیاده‌سازی شده در سیمولینک

۳- شبیه‌سازی عددی

در این بخش با به‌کارگیری پارامترهای فیزیکی [۱۲] یک ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS (جدول ۱) در مدل سیمولینک معرفی شده در بخش پیشین، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی به دست آمده و ارائه می‌شوند. با توجه به رابطه‌ی $\omega_n = \sqrt{k_x/m_p}$ ، فرکانس طبیعی ارتعاشات ژيروسکوپ معادل ۱۴ کیلوهرتز به دست می‌آید که به عنوان فرکانس نیروی محرک $F_D(t)$ نیز تنظیم می‌شود. به علاوه، در تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده میزان سرعت چرخش Ω معادل ۱ رادیان بر ثانیه فرض شده است. همچنین براساس تعریف، ضریب کیفیت (Quality Factor) را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد [۱۳]

$$Q = m_p \omega_n / c_x \quad (۹)$$

ضریب کیفیت فاکتوری است که مشخص‌کننده‌ی پهنای باند سیستم‌های ارتعاشی بوده و میزان حساسیت آن سیستم به فرکانس‌های پهنای باند را نشان می‌دهد. هر چه ضریب کیفیت عدد بزرگتری باشد پهنای باند کوچکتر بوده اما پاسخ سیستم در فرکانس طبیعی با ضریب بزرگتری تقویت می‌شود. به منظور بررسی جامع و دقیق رفتار دینامیکی ژيروسکوپ MEMS و مطالعه‌ی میزان حساسیت آن در برابر نویزهای ارتعاشی و آکوستیکی، شبیه‌سازی‌ها در دو بخش انجام شده‌اند. در بخش اول یک نویز هارمونیک سینوسی و در بخش دوم نویز تصادفی سفید به دستگاه ژيروسکوپ اعمال شده و خروجی سیستم در راستای حسگری y مورد مشاهده و مطالعه قرار می‌گیرند. در هر دو بخش، نتایج به دست آمده با خروجی سیستم در حالت کارکرد «بدون نویز» مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

۳-۱- نویز آکوستیک هارمونیک

در این شبیه‌سازی نیروی نویز آکوستیکی واردشده به چارچوب ژيروسکوپ به شکل یک موج سینوسی هارمونیک به فرم زیر در نظر گرفته شده است

$$F_n(t) = F_n \sin(\omega t) \quad (۱۰)$$

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

پارامترها	مقادیر	پارامترها	مقادیر
m_p	1×10^{-8} kg	m_f	3.8×10^{-4} kg
k_x	77.38 N/m	k_f	200 N/m
k_y	77.38 N/m	c_f	5×10^{-3} N. s/m
c_x	5×10^{-7} N. s/m	Ω	1 rad/s
c_y	5×10^{-7} N. s/m	w	7.2×10^{-3} m
ω_n	14 kHz	h	3.1×10^{-3} m
F_D	3×10^{-6} N		

در این رابطه، ω فرکانس نویز هارمونیک وارد شده به ژيروسکوپ است. دامنه‌ی این نیرو وابسته به فشار نویز آکوستیکی P_n ، برخوردکننده به ژيروسکوپ، مساحت دیواره‌های چارچوب آن و زاویه‌ی برخورد موج آکوستیکی به ژيروسکوپ است. فشار آکوستیکی نیز به نوبه‌ی خود به سطح فشار صوتی یا SPL مرتبط است. با توجه به تعریف سطح فشار صوتی [۱۴]، فشار را می‌توان بر طبق فرمول ذیل محاسبه کرد:

$$P_n = (2 \times 10^{SPL/10} P_{ref}^2)^{1/2} \quad (11)$$

که در آن $P_{ref} = 20 \times 10^{-6}$ Pa فشار مرجع است. در نتیجه،

$$F_n = A \times P_n = w h P_n \quad (12)$$

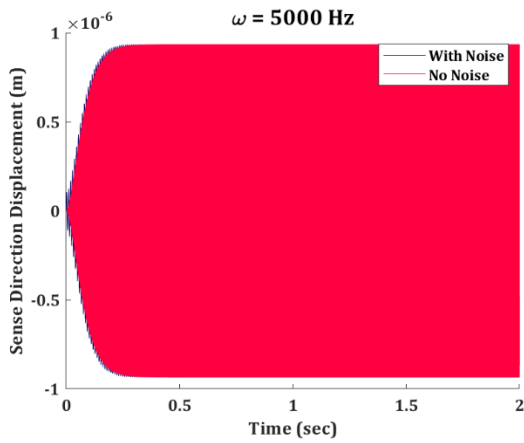
در این شبیه‌سازی عملکرد ژيروسکوپ در مقابل نویزهای آکوستیکی فرکانس بالای پرتوان مورد بررسی قرار می‌گیرد. گروهی از فرکانس‌های ω و سطوح فشار صوتی SPL منتخب در نظر گرفته شده و پاسخ ارتعاشی ژيروسکوپ در برابر نویز وارد شده به دست آمده است. به علاوه، تاثیر ضریب کیفیت Q بر میزان حساسیت ژيروسکوپ به نویز هم مطالعه شده است. بدین ترتیب سه گروه شبیه‌سازی متفاوت صورت گرفته است: در گروه A اثر فرکانس نویز، گروه B اثر سطح فشار صوتی و در گروه C اثر ضریب کیفیت در نظر گرفته شده‌اند. جدول (۲) پارامترهای تنظیم شده در هر یک از گروه‌های شبیه‌سازی ذکر شده را نشان می‌دهد.

۳-۱-۱- تاثیر فرکانس نویز ω

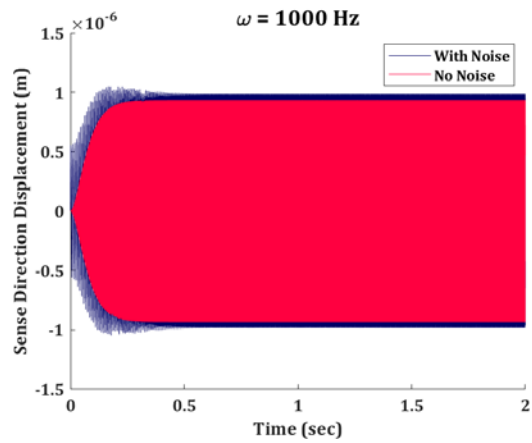
به منظور بررسی تاثیر فرکانس موج آکوستیکی، پارامترهای گروه A جدول (۲) در مدل دینامیکی در نظر گرفته شد. شکل‌های (۳)-(۷) پاسخ ارتعاشی شبیه‌سازی جرم گواه در راستای حسگری y_m را به ازای برخی فرکانس‌های نویز منتخب نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، پاسخ سیستم در هنگام حضور نویز آکوستیکی با پاسخ سیستم هنگام عدم وجود نویز ($F_n = 0$) مقایسه شده است. بدین ترتیب می‌توان اثر نویز بر عملکرد و دقت ژيروسکوپ را مورد بررسی قرار داد. همان‌طور که در شکل‌های (۴) تا (۸) دیده می‌شود، با افزایش فرکانس نویز تا محدوده‌ی فرکانس طبیعی، پاسخ ارتعاشی ژيروسکوپ به حالت بدون نویز نزدیک‌تر شده و دقت افزایش پیدا می‌کند. اما، در حالتی که فرکانس نویز نزدیک یا منطبق بر فرکانس طبیعی سیستم است (شکل ۷)، پاسخ ارتعاشی دچار رزونانس شده و عملکرد ژيروسکوپ را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، دقت سیگنال خروجی ژيروسکوپ دیگر قابل اعتماد نبوده و تخریب شده است. مشاهده می‌شود که فرکانس‌های نویز بزرگتر از فرکانس طبیعی هم تاثیر نامطلوبی ندارند.

جدول ۲- پارامترهای تنظیم شده در سه گروه شبیه‌سازی نویز هارمونیک

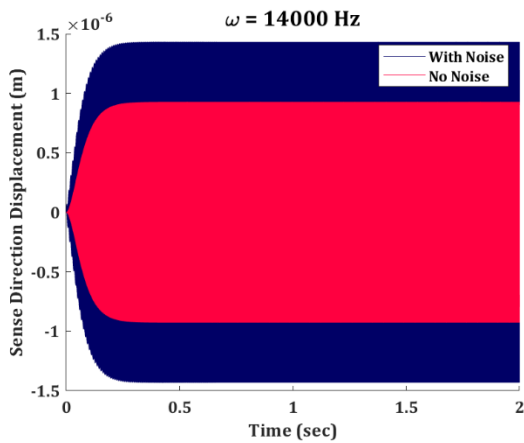
Group A	$SPL = 126 \text{ dB}$, $Q = 1800$
	ω 1000 – 25000 Hz
Group B	$\omega = 14 \text{ kHz}$, $Q = 1800$
	SPL 84 – 144 dB
Group C	$\omega = 14 \text{ kHz}$, $SPL = 102 \text{ dB}$
	Q 500 – 2500



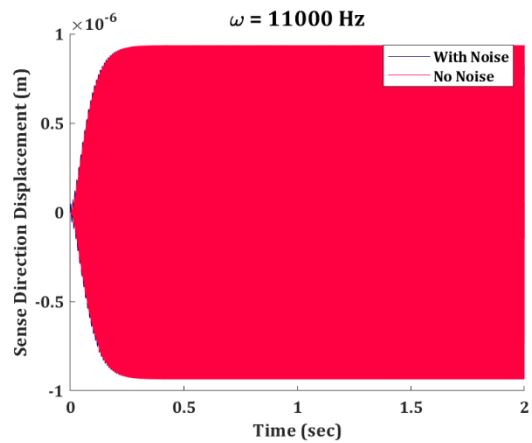
شکل ۵- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به ازای $\omega = 5000 \text{ Hz}$



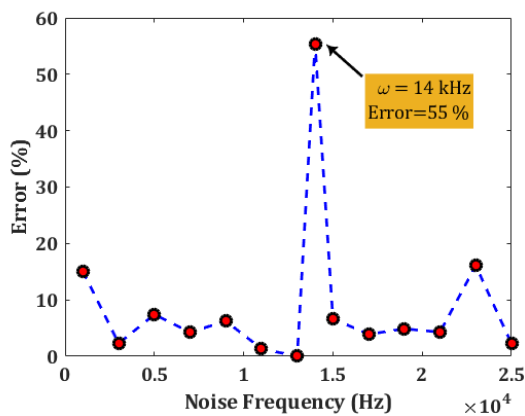
شکل ۴- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به ازای $\omega = 1000 \text{ Hz}$



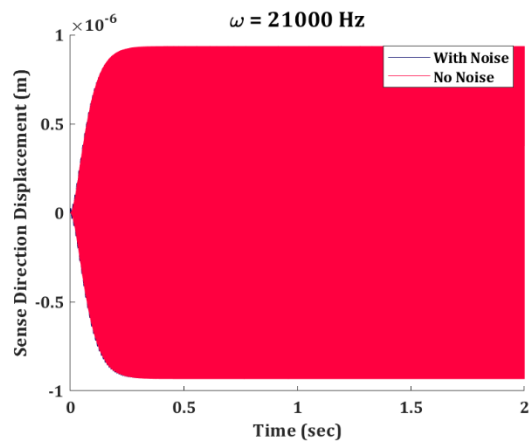
شکل ۷- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به ازای $\omega = 14000 \text{ Hz}$



شکل ۶- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به ازای $\omega = 11000 \text{ Hz}$



شکل ۹- روند تغییرات خطای حالت ماندگار نسبت به فرکانس نویز



شکل ۸- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به ازای $\omega = 21000 \text{ Hz}$

روند تغییرات خطای حالت ماندگار پاسخ ارتعاشی ژيروسکوپ را می‌توان در شکل (۹) مشاهده نمود. همان‌گونه که بحث شد، مشخص است که در محدوده‌ی فرکانس طبیعی سیستم، رزونانس باعث ایجاد خطای چشم‌گیر شده و عملکرد ژيروسکوپ را منحرف می‌کند. میزان این خطا، در حدود ۵۵ درصد به دست آمده است.

۳-۱-۲- تاثیر قدرت نویز SPL

سطح نویز آکوستیکی نیز می‌تواند تاثیر به‌سزایی در عملکرد ژيروسکوپ داشته باشد. جهت بررسی تاثیر قدرت موج آکوستیکی، پارامترهای گروه B جدول (۲) در مدل دینامیکی در نظر گرفته شد. شکل‌های (۱۰)–(۱۲) پاسخ ارتعاشی شبیه‌سازی شده جرم گواه در راستای حسگری y_m را به ازای برخی سطح فشار صوتی منتخب نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، پاسخ سیستم در هنگام حضور نویز آکوستیکی با پاسخ سیستم هنگام عدم وجود نویز ($F_n = 0$) مقایسه شده است. یادآوری می‌شود فرکانس نویز اعمال شده در این حالت بر فرکانس طبیعی سیستم منطبق است و در نتیجه، بدترین حالت در نظر گرفته شده است.

با توجه به شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) مشاهده می‌شود که با افزایش سطح فشار صوتی، یا به عبارت دیگر SPL، همان‌طور که انتظار می‌رود میزان تخریب نویز در عملکرد ژيروسکوپ بیشتر می‌شود و نسبت نویز به سیگنال افزایش پیدا می‌کند تا جایی که در مقادیر بالای 120 dB میزان خطا به صد در صد و بالاتر می‌رسد. در قدرت $SPL = 140$ dB خطای ماندگار به مقدار پانصد درصد صعود می‌کند که به طور قطع ژيروسکوپ را کاملاً بدون استفاده می‌کند و حتی ممکن است به اجزای داخلی آن آسیب دائمی برساند. روند تغییرات خطای حالت ماندگار ژيروسکوپ با میزان تغییرات سطح فشار صوتی در شکل (۱۳) ترسیم شده است.

۳-۱-۳- تاثیر ضریب کیفیت Q

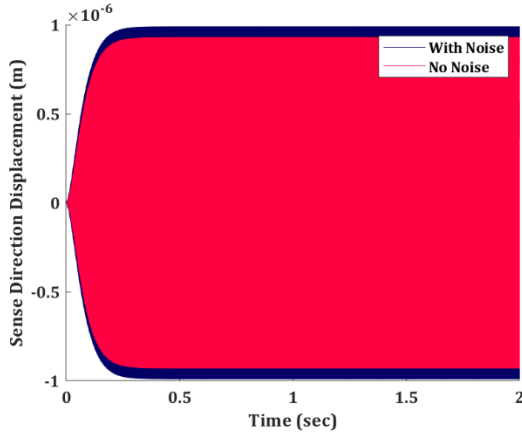
ضریب کیفیت یک پارامتر بی‌بعد است که میزان کم میرایی یک سیستم ارتعاشی را نشان می‌دهد. این ضریب را می‌توان به صورت نسبت فرکانس رزونانس ارتعاش کننده به پهنای باند آن تعریف کرد

$$Q = f_r / \Delta f \quad (13)$$

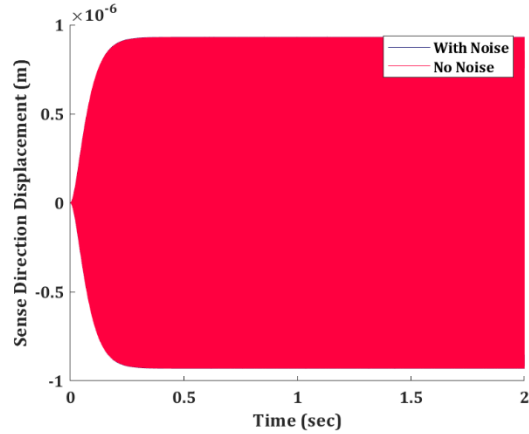
که f_r فرکانس رزونانس سیستم و Δf پهنای باند آن است. ضریب کیفیت در سیستم‌های ارتعاشی مکانیکی به صورت زیر تعریف می‌شود

$$Q = m\omega_n / c \quad (14)$$

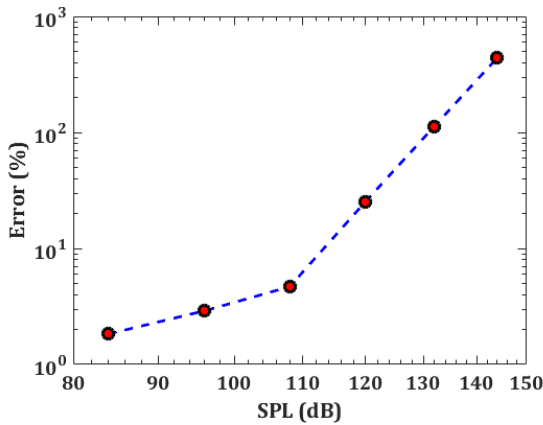
با توجه به رابطه (۱۴) واضح است که سیستم ارتعاشی با ضریب کیفیت بالا ضریب استهلاک c کوچکتری داشته و ارتعاش قوی‌تری دارد. به عبارت دیگر، دامنه‌ی ارتعاش در فرکانس رزونانس یک سیستم با ضریب Q بالا بزرگتر است دامنه‌ی ارتعاش یک سیستم با ضریب کمتر در همان رزونانس خواهد بود (ضریب بزرگنمایی بزرگتر). در مقابل، چنین سیستمی به دلیل پهنای باند کمتر، محدوده‌ی فرکانسی کوچکتری در اطراف فرکانس رزونانس را تحریک می‌کند. در ژيروسکوپ‌های ارتعاشی، به منظور دستیابی به ضریب بزرگنمایی بهتر و جلوگیری از برانگیخته شدن فرکانس‌های کمتر در پاسخ سیستم در راستای حسگری، سعی می‌شود تا ضریب کیفیت تا حد ممکن بالا باشد. به منظور بررسی تاثیر ضریب کیفیت، پارامترهای گروه C جدول (۲) در مدل دینامیکی در نظر گرفته شد.



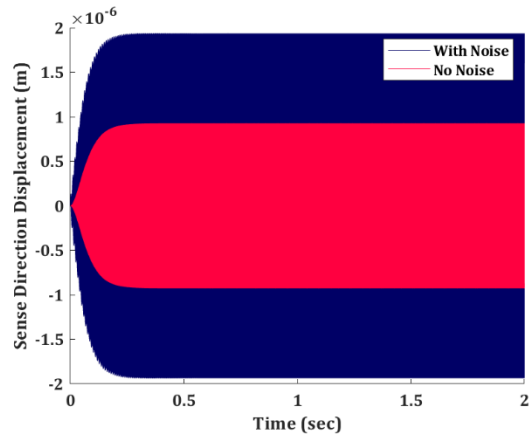
شکل ۱۰- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به ازای $SPL = 108 \text{ dB}$



شکل ۱۱- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به ازای $SPL = 84 \text{ dB}$



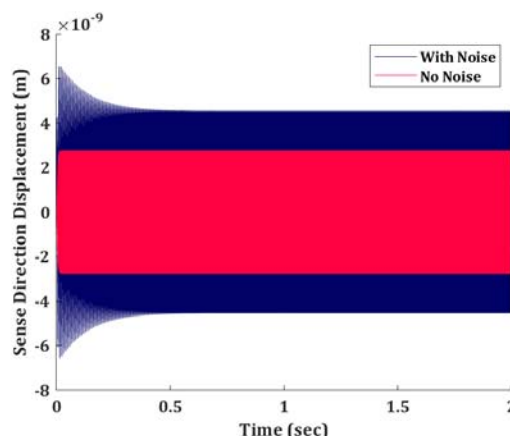
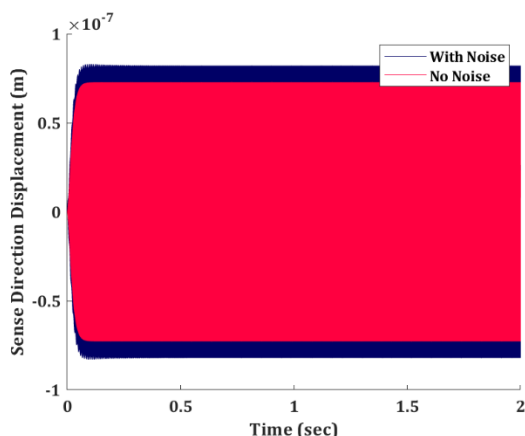
شکل ۱۲- روند تغییرات خطای حالت ماندگار نسبت به سطح فشار صوتی



شکل ۱۳- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به ازای $SPL = 132 \text{ dB}$

شکل‌های (۱۴)-(۱۶) پاسخ ارتعاشی شبیه‌سازی جرم گواه در راستای حسگری γ_m را به ازای برخی ضرایب منتخب Q نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، پاسخ سیستم در هنگام حضور نویز آکوستیکی با پاسخ سیستم هنگام عدم وجود نویز ($F_n = 0$) مقایسه شده است.

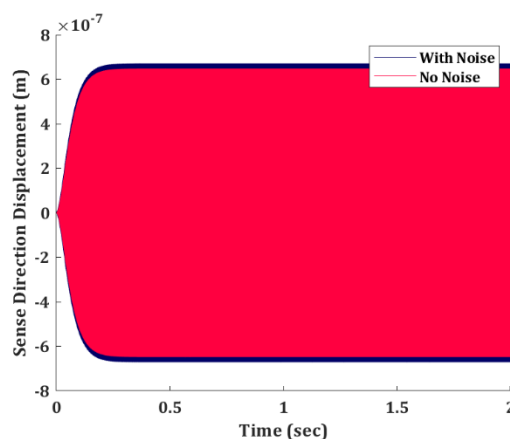
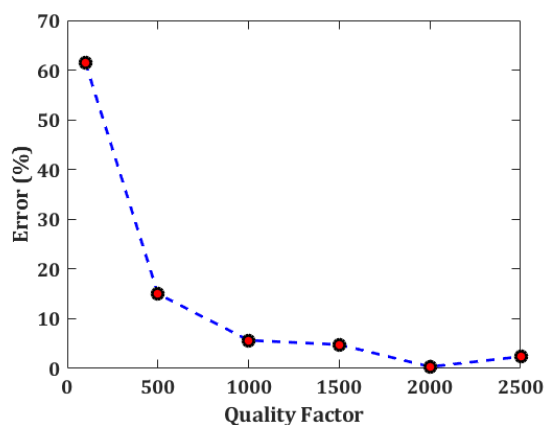
همان‌طور که در شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) مشخص است و انتظار می‌رود، با بالا رفتن ضریب کیفیت (کاهش c) ژيروسکوپ، اثر نویز در پاسخ ارتعاشی آن کمتر می‌شود و عملکرد و صحت سیگنال افزایش پیدا می‌کند. نمودار تغییرات خطا نسبت به ضریب کیفیت در شکل (۱۷) نیز همین روند را نشان می‌دهد. در مقادیر پایین Q ($Q < 500$) میزان خطا به شدت افزایش پیدا می‌کند و نویز اثرات مخرب غیر قابل چشم‌پوشی بر صحت سیگنال اصلی می‌گذارد.



شکل ۱۴- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به ازای $Q = 100$ شکل ۱۵- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری

به ازای $Q = 500$

ازای $Q = 100$



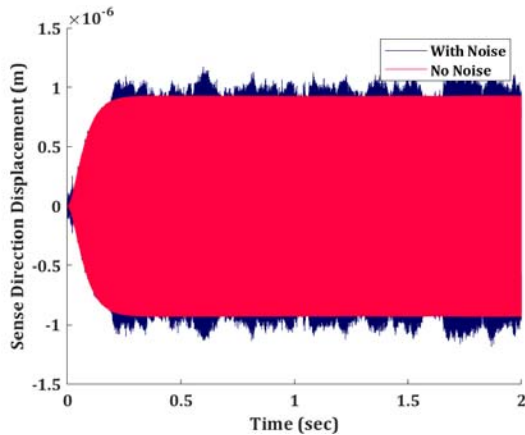
شکل ۱۶- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به ازای $Q = 1500$ شکل ۱۷- روند تغییرات خطای حالت ماندگار نسبت به

ضریب کیفیت

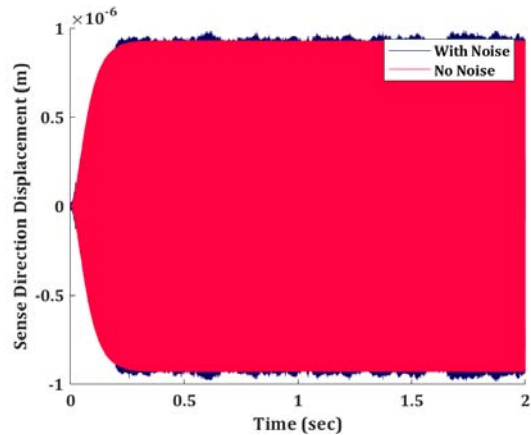
ازای $Q = 1500$

۳-۲- نویز آکوستیک تصادفی

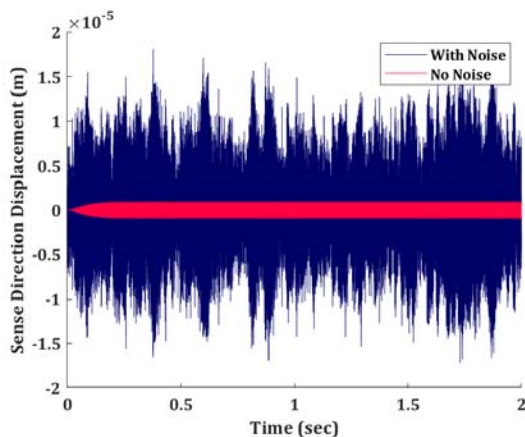
در این بخش فرض می‌شود که اغتشاشات پرتون آکوستیکی به شکل یک نویز تصادفی سفید گاوسی (Random Gaussian White Noise) به ژيروسکوپ وارد می‌شود و اثرات دو پارامتر سطح قدرت نویز و ضریب کیفیت دستگاه MEMS بر صحت عملکرد حسگری ژيروسکوپ بررسی خواهد شد. در کاربردهای عملی واقعی بسیاری نیز سیگنال‌های اغتشاشات صوتی مزاحم به شکل تصادفی و در محدوده‌ی وسیعی از فرکانس‌ها ایجاد می‌شوند. نویز سفید به سیگنالی گفته می‌شود که توان آن به‌طور یکنواخت در همه‌ی فرکانس‌ها توزیع شده باشد. به همین دلیل به آن «سفید» می‌گویند، زیرا تابع چگالی طیف توان آن در همه‌ی فرکانس‌ها مانند نور سفید مقداری تقریباً ثابت دارد. تابع خودهمبستگی نویز سفید به صورت تابع دلتای دیراک است. نویز سفید، ذاتاً یک فرایند اتفاقی است؛ بنابراین، یک مدل آماری برای سیگنال‌ها و منابع سیگنال است، نه یک سیگنال خاص. اگر توزیع آماری یک نویز به صورت گاوسی باشد به آن نویز گاوسی گفته می‌شود. در مدل دینامیکی ساخته‌شده در سیمولینک (شکل ۳) از یک بلاک نویز سفید (White Noise Block) برای تولید سیگنال تصادفی مورد نظر استفاده شده است.



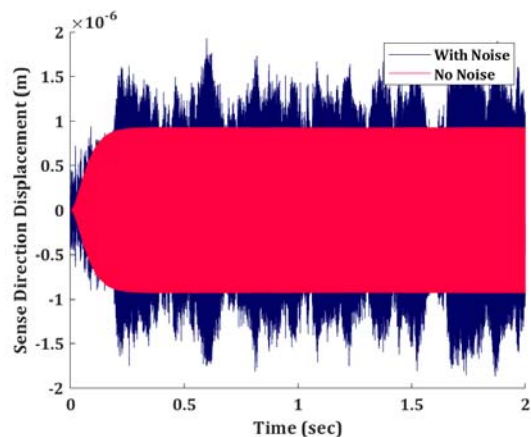
شکل ۱۹- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری
به ازای $SPL = 96 \text{ dB}$



شکل ۱۸- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به
ازای $SPL = 84 \text{ dB}$



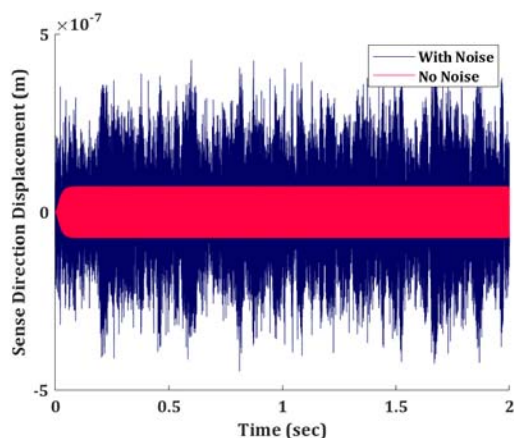
شکل ۲۱- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری
به ازای $SPL = 132 \text{ dB}$



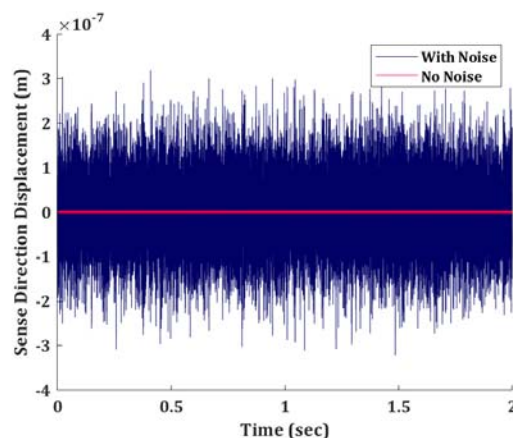
شکل ۲۰- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری به
ازای $SPL = 108 \text{ dB}$

۳-۲-۱- تاثیر قدرت نویز SPL

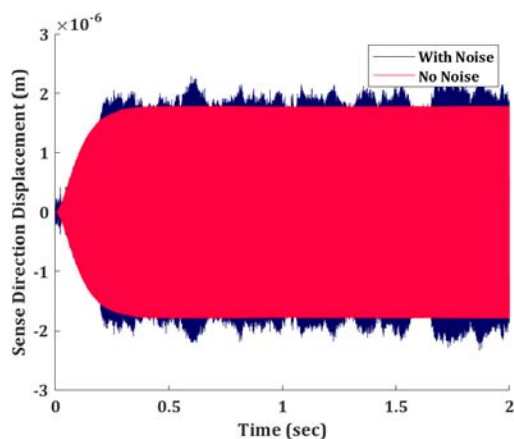
شکل‌های (۱۸) تا (۲۱) پاسخ ارتعاشی شبیه‌سازی جرم گواه در راستای حسگری y_m را به ازای برخی سطح‌های فشار صوتی منتخب در نویز سفید آکوستیکی نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، جهت مقایسه پاسخ سیستم بدون وجود نویز هم رسم شده است. در مدل دینامیکی نیز ضریب کیفیت معادل $Q = 1800$ فرض شده است. همان‌طور که از شکل‌های (۱۹) تا (۲۱) مشخص است، به دلیل محتوای فرکانسی وسیع یک سیگنال نویز سفید، با افزایش سطح فشار صوتی موج آکوستیکی اثرات مخرب در پاسخ دینامیکی و در نتیجه صحت عملکرد حسگری ژيروسکوپ به شدت افزایش پیدا می‌کند. می‌توان دید که تفاوت دامنه‌ی پاسخ در حالت نویز تصادفی حتی از حالت نویز هارمونیک در یک SPL معین هم بیشتر است. این به نوبه‌ی خود اثرات مخرب شدیدتر نویزهای تصادفی را نشان می‌دهد.



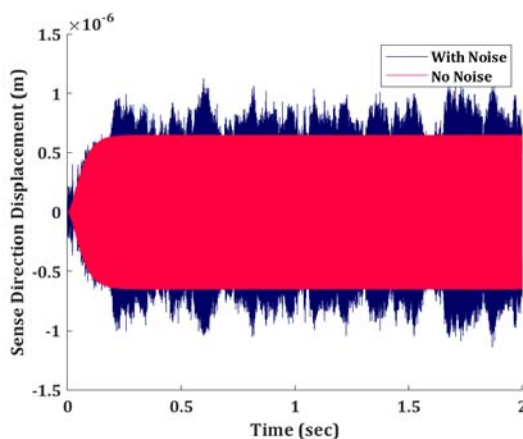
شکل ۲۳- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری
به ازای $Q = 500$



شکل ۲۲- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری
به ازای $Q = 100$



شکل ۲۵- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری
به ازای $Q = 2500$



شکل ۲۴- پاسخ ارتعاشی جرم گواه در راستای حسگری
به ازای $Q = 1500$

۳-۲-۲- تاثیر ضریب کیفیت Q

در این بخش سطح فشار صوتی در $SPL = 102$ dB ثابت نگه داشته شده و اثر تغییر ضریب کیفیت بر میزان تخریب نویز سفید آکوستیکی بررسی شده است. شکل‌های (۲۲)–(۲۵) پاسخ ارتعاشی شبیه‌سازی جرم گواه در راستای حسگری y_m را به ازای برخی ضرایب کیفیت منتخب نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل‌های (۲۲) تا (۲۵) مشخص است، در مقادیر کم Q به دلیل پهنای باند بزرگ سیستم و محتوای فرکانسی وسیع و پر قدرت نویز، اغتشاشات به میزان قابل توجهی بر سیگنال اثر گذاشته و به طور کلی آن را از بین برده‌اند. هرچه ضریب کیفیت افزایش پیدا کند این موضوع کمتر شده و با تقویت سیگنال اصلی در مقابل نویز اثرات مخرب آن کاهش پیدا می‌کند.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر نویزهای آکوستیکی بر قدرت فرکانس بالا بر پاسخ دینامیکی و صحت سیگنال حسگری ژيروسکوپهای ارتعاشی MEMS مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا معادلات دیفرانسیل دینامیک سیستم با در نظر گرفتن چارچوب محافظ استخراج شده و جهت سهولت پیاده سازی در نرم افزار شبیه سازی سیمولینک به فرم معادلات حالت بازنویسی شد. در این معادلات اندرکنش امواج آکوستیکی نیز به شکل نیروی وارد شده به چارچوب ژيروسکوپ مدل شده است. در ادامه، با استفاده از معادلات حالت به دست آمده یک مدل سیمولینک از دینامیک ژيروسکوپ ارتعاشی MEMS پیاده سازی شد. در مرحله ی بعد، با در نظر گرفتن حالات مختلف اثر نویزهای آکوستیکی بر عملکرد و پاسخ دینامیکی ژيروسکوپ مورد مطالعه قرار گرفت. در این بخش تاثیر تغییرات پارامترهای مختلفی مانند فرکانس نویز، سطح قدرت نویز و ضریب کیفیت ژيروسکوپ مد نظر قرار گرفتند. به علاوه، نویز آکوستیکی نیز در دو حالت امواج هارمونیک و تصادفی در نظر گرفته شد. نشان داده شد که نزدیکی فرکانس نویز به فرکانس رزونانس سیستم می تواند اثرات اغتشاشی نویز را به شدت تقویت کند در حالی که با فاصله گرفتن فرکانس از رزونانس، نویز تاثیر قابل توجهی بر پاسخ سیستم ندارد. همان طور که انتظار می رفت، افزایش قدرت (سطح فشار صوتی) نویز می تواند ارتعاشات ناخواسته ی شدیدی ایجاد کند که موجب تخریب صحت عملکرد ژيروسکوپ شود. همچنین بررسی ها نشان دادند که ضریب کیفیت نیز عامل کمک کننده داشته و افزایش آن موجب تقویت هرچه بیشتر سیگنال نسبت به نویز می شود.

مراجع

- [1] Patel, C., and McCluskey, P., "Performance of MEMS Vibratory Gyroscopes in Harsh Environments", 8th International Conference and Exhibition on Device Packaging, Chicago, USA, pp. 633-654, (2012).
- [2] Yoon, S.W., Lee, S.W., and Najafi, Kh., "Vibration-induced Errors in MEMS Tuning Fork Gyroscopes", Sensors Actuators A: Physical, Vol. 180, pp. 32-44, (2012).
- [3] Yoon, S.W., Lee S.W., Perkins N.C., and Najafi, K., "Vibration Sensitivity of MEMS Tuning Fork Gyroscopes", Proceedings of IEEE Sensors, Atlanta, USA, pp. 115-119, (2007).
- [4] Hyvönen, H., "Thermomechanical and Mechanical Characterization of a 3-Axial MEMS Gyroscope", Aalto University, Helsinki, Finland, (2011).
- [5] Patel, C., and McCluskey, P., "Performance Degradation of the MEMS Vibratory Gyroscope in Harsh Environments", ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Colorado, USA, pp. 511-515, (2011).
- [6] Choa, S. H., "Reliability of Vacuum Packaged MEMS Gyroscopes", in Microelectronics Reliability, Vol. 45, pp. 361-369, (2005).
- [7] Weinberg, M.S., and Kourepenis, A., "Error Sources in In-plane Silicon Tuning-fork MEMS Gyroscopes", Journal of Microelectromechanical System, Vol. 15, pp. 479-491, (2006).

- [8] Dean R., Flowers G., Hodel S., MacAllister K. and Horvath R., "Vibration Isolation of MEMS Sensors for Aerospace Applications", Proceedings of the SPIE Proceedings Series; SPIE: Bellingham, WA, USA, pp. 166-170, (2002).
- [9] Dean, R., Flowers, G., Sanders, N., MacAllister, K., Horvath, R., Hodel, A. S., Johnson, W., Kranz, M., and Whitley, M., "Damping Control of Micromachined Lowpass Mechanical Vibration Isolation Filters using Electrostatic Actuation with Electronic Signal Processing", Proceedings of the SPIE International Symposia on Smart Structures and Materials, SPIE, San Diego, USA, pp. 11-22, (2005).
- [10] Dean, R.N., Flowers, G.T., Hodel, A.S., Roth, G., Castro, S., Zhou, R., Moreira, A., Ahmed, A., Rifki, R., and Grantham, B. E., "On the Degradation of MEMS Gyroscope Performance in the Presence of High Power Acoustic Noise", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vigo, Spain, pp. 1435-1440, (2007).
- [11] Castro, S., Dean, R., Roth, G., Flowers, G. T., and Grantham, B., "Influence of Acoustic Noise on the Dynamic Performance of MEMS Gyroscopes", Mechanical Systems and Control, Vol. 9, pp. 1825-1831, (2007).
- [12] Soobramaney, P., Flowers, G., and Dean, R., "Mitigation of the Effects of High Levels of High-frequency Noise on MEMS Gyroscopes using Microfibrous Cloth", Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Boston, USA, pp. 2-5, (2015).
- [13] Rao, S.S., "Mechanical Vibrations", 5th Edition, Pearson-Prentice Hall, Upper Saddle River, (2011).
- [14] Müller, G., and Möser, M., "Handbook of Engineering Acoustics", Springer, Berlin/Heidelberg, Germany, (2013).

فهرست نمادهای انگلیسی

A : ماتریس حالت

B : ماتریس ورودی

C : ماتریس خروجی

C_f, C_x, C_y : ثابت مستهلک کننده

f_r : فرکانس رزونانس

F_n : نیروی نویز

F_D : نیروی تحریک

I : گشتاور دوم لختی

k_f, k_x, k_y : ثابت فنر

m_f, m_p : جرم

P_n : فشار آکوستیکی

P_{ref} : فشار مرجع

q_j : مختصات تعمیم یافته

Q : ضریب کیفیت

Q_j : نیروی تعمیم یافته

R : تابع اتلاف رایلی

T : انرژی جنبشی

u : بردار ورودی حالت

V : انرژی پتانسیل

x_f, x_p : جابجایی افقی

X : بردار حالت

y_f, y_p : جابجایی عمودی

Y : بردار خروجی حالت

نمادهای یونانی

θ : زاویه‌ی برخورد موج آکوستیک

δW : کار مجازی

ω : فرکانس هارمونیک نویز

ω_n : فرکانس طبیعی

Ω : سرعت زاویه‌ای چرخش

Abstract

In the present article, the effects of high-power high-frequency acoustic noise on the dynamical response and fidelity of the sensing signal of the MEMS vibratory gyroscopes are investigated. At first, differential equations of motion the system with four degrees of freedom by considering the frame of the gyroscope are derived and rewritten in state-space form. In these equations, the interaction of the acoustic noise with the gyroscope is modeled as a mechanical force. Then, a Simulink model of the MEMS vibratory gyroscope dynamics is established and the effects of harmonic and random high-power high-frequency acoustic noises on the performance of gyroscope are studied. Influences of different parameters such as harmonic noise frequency, sound pressure level and quality factor of the gyroscope are explored. Numerical simulation results show the proximity of the noise frequency to the resonance of the gyroscope as well as pressure level deteriorate the sensing signal while the quality factor of the system rejects noise effects.