

طراحی سیستم کنترل وضعیت یک ماهواره بر با بوسترهای جانبی در معرض ارتعاشات در فضای زیرباند مستقیم

عبدالمجید خوشنود^۱، ایوب شیبانی^۲

۱ استادیار دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، khoshnood@kntu.ac.ir

۲ کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۴/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۰۹

چکیده

کنترل ارتعاشات سیستم‌های چندجسمی انعطاف‌پذیر نظیر ماهواره‌برهای دارای بوستر جانبی در کاربردهای جاری، به دلیل بالا بودن درجات آزادی، با چالش‌های بسیاری روبروست. در این میان، روش‌های مدل‌سازی پاسخ فرکانسی نقش مفیدی دارند. در این نگاه، با یافتن فرکانس‌های غالب سیستم و فیلترنمودن فعال آنها، مشابه حذف نوفه در فیلترهای زیرباند، می‌توان سیستم را در برابر ارتعاشات کنترل کرد. تاکنون در بسیاری از فعالیت‌های مشابه از روش‌های تمام‌باند استفاده شده است که البته نتوانسته‌اند برای سیستم‌های پیچیده به کار روند. توانمندی قابل قبول روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنال‌ها به طراحی کنترل‌کننده‌های ارتعاشات کاربردی و قابل استفاده‌ای منجر می‌شود. در این مقاله، کاهش ارتعاشات در فضای زیرباند برخط به‌عنوان یک نوآوری مهم مطرح شده است. در این روش تنها مشکل، کاربرد و مدل‌سازی روش فوق در حلقه بسته سیستم‌های کنترل به دلیل وجود تأخیرهای بالا در سیستم‌های پردازش می‌باشد که به ناپایداری احتمالی سیستم ایجاد شده است. در این مقاله، روشی برای رفع این مشکل در حلقه بسته سیستم کنترل ارائه شده است. این روش بر پایه مدل‌سازی روش پیش‌بین اسمیت به‌همراه مدل مرجع تطبیقی بنا شده است. شبیه‌سازی این روش روی یک ماهواره‌بر دارای چهار بوستر جانبی نتایج بسیار مطلوبی برای کاهش ارتعاشات با فرکانس‌های متنوع نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی

کنترل ارتعاشات، ماهواره‌بر دارای بوستر جانبی، پردازش سیگنال چندنرخ، فیلتر تطبیقی زیرباند، روش پیش‌بین اسمیت

۱. مقدمه

کنترلی به سیستم‌هایی پیچیده هدایت می‌کند. از جمله مشکلات مدل‌سازی این سیستم‌ها مسئله افزایش درجات آزادی حتی تا

سیستم‌های دینامیکی چندجسمی، همچون ماهواره‌برهای دارای بوستر جانبی، ویژگی‌های منحصر به فردی دارند که آنها را در اهداف

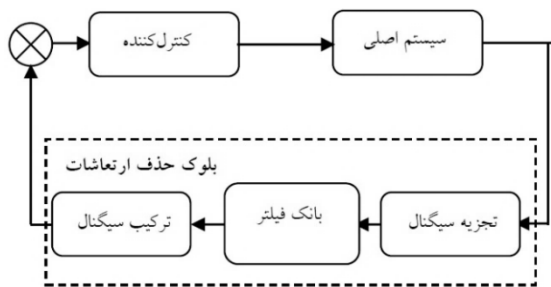
بی‌نهایت است. این موضوع کنترل سیستم را به سیستمی با درجات آزادی بالا رهنمون می‌کند که خود در طراحی و مدلسازی بسیار قابل توجه است [۱-۴]. مشکل بعدی در چندجسمی‌ها مربوط به موضوع تداخل فرکانس‌های ارتعاشی زیرسیستم‌های متنوع با زیرسیستم‌های کنترل است؛ زیرا در صورت بروز چنین موضوعی، تشدید و رزونانس^۱ سیستم را با چالش‌های متعددی روبرو خواهد کرد. با این مقدمه می‌توان گفت که طراحی کنترل سیستم‌های دینامیکی با زیرسیستم‌های ارتعاشی متنوع یا همان چندجسمی‌های انعطاف‌پذیر از مباحث قابل توجه در فعالیت‌های جاری دانشگاه‌ها و صنایع است.

در میان روش‌های کلی کنترل سامانه‌های انعطاف‌پذیر، راهبرد کاهش تحریک ارتعاشی از جمله روش‌هایی است که تلاش دارد به‌گونه‌ای تدوین گردد تا کمترین تأثیر را بر سیستم کنترل اصلی داشته باشد [۵]. به‌عبارتی، چون طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل سامانه‌های بدون ارتعاش، خود با چالش‌ها و مشکلات بسیاری روبروست، سیستم کنترل ارتعاشات نباید عملکرد این سیستم کنترلی را مختل کند [۶]. به بیان دیگر، بهترین سیستم برای کنترل ارتعاشات مدلی است که بر سیستم اصلی کنترل وضعیت بی‌تأثیر باشد. این موضوع یکی از مهمترین پارامترها در طراحی سیستم کنترل ارتعاشات خواهد بود.

سیستم‌های حامل ماهواره، که در آنها کلاسترهای^۲ جانبی برای افزایش توان حمل استفاده می‌شوند، سامانه‌هایی ارتعاشی و چندجسمی‌اند که مدلسازی سیستم کنترل ارتعاشات خمشی آنها با توجه به طیف وسیع فرکانسی موضوعی قابل توجه می‌باشد. از جمله روش‌های طراحی و مدلسازی سیستم کنترل ارتعاشات با دیدگاه راهبردی فوق، روش زیرباند^۳ است که در آن دو بخش تجزیه و ترکیب سیگنال عملیات اصلی را انجام می‌دهد. از طرفی می‌توان این روش را به دو دسته کلی تقسیم نمود: در یکی از تقسیم‌بندی‌ها، که در آن بلوک کنترل ارتعاشات مستقیماً در مسیر حلقه کنترل قرار نمی‌گیرد و روش بدون تأخیر نام دارد، تلاش می‌شود سیستم زیرباند خارج از مسیر اصلی حلقه کنترلی وظیفه کنترل ارتعاشات را انجام دهد [۷-۸]. دسته دوم از روش‌های طراحی به گروهی اختصاص دارد که در ادامه روش مستقیم خوانده می‌شود.

در این مقاله روش مستقیم، که در آن بلوک کنترل مستقیماً در حلقه سیستم چندجسمی قرار می‌گیرد، مورد توجه است. شاید بتوان گفت استفاده از روش‌های بانک فیلتری و موجک‌ها در بررسی‌های

مشابه و سیستم‌هایی که به نوعی با سیگنال‌های ارتعاشی یا نوفه سروکار دارند، در اغلب موارد به فعالیت‌های خارج خط منتهی شده است. با این حال، تنها در یکی از پژوهش‌ها چاپلایس^۴ و همکاران برای مدلسازی کنترل داخلی یک چرخ عکس‌عملی مربوط به یک ماهواره از عنوان موجک برخط^۵ استفاده کرده‌اند [۹]. این بلوک پردازش داخل سیستم حلقه‌بسته کنترلی به‌طور مستقیم قرار گرفته است. این پژوهشگران راهکار حل تأخیر ایجادشده توسط بلوک پردازش را روش پیش‌بین اسمیت معرفی کرده‌اند. لذا می‌توان از همین روش برای بانک فیلتر برخط در سیستم ماهواره‌بر الگوگیری کرد. چالش عمده این است که بانک فیلتر مورد استفاده به دلیل وسعت طیف فرکانسی تأخیر بیشتری خواهد داشت که معضلی بر سر راه مدلسازی است و باید بررسی شود. همان‌گونه که بلوک دیاگرام شکل ۱ مشاهده می‌شود، سیستم پردازش مستقیماً در حلقه اصلی کنترل قرار می‌گیرد.



شکل ۱. بلوک دیاگرام سیستم کنترل ارتعاشات مستقیم

این موضوع در کنار مزایایی که در کنترل مستقیم ارتعاشات و نوفه‌ها دارد، از معضل بزرگی نیز رنج می‌برد. این معضل به تأثیر این بخش بر سیگنال پس‌خور و نهایتاً ایجاد چالش برای عملکرد و پایداری سیستم کنترل اصلی بازمی‌گردد. اساساً در این زمینه دو تأثیر مهم را می‌توان مطرح کرد:

۱. تأخیر ایجادشده در اثر عملکرد پردازش سیگنال

۲. کیفیت سیگنال مطلوب عبوری از سیستم پردازش

در این مقاله، یک ماهواره‌بر با چهار بوسه جانبی انعطاف‌پذیر مدلسازی شده و برای کنترل ارتعاشات این سیستم از روش مستقیم آنالیز ارتعاشات بر اساس بانک فیلترها استفاده شده است. رفتار خمشی ماهواره‌بر و بوسه‌های جانبی آن در یک حوزه وسیع فرکانسی می‌تواند سبب عملکرد غیردقیق سیستم کنترل یا قرارگرفتن در وضعیت رزونانس شود. در این نگرش اصل این است که یک سیستم کنترل اولیه برای کنترل وضعیت سیستم طراحی

بازسازی شود و به مدار کنترل بازگردد. همه این موارد سبب می‌شود انتخاب نوع بانک فیلتر اهمیت یابد. از میان بانک فیلترهای مختلف می‌توان انتخاب را به سمت مدلسازی بانک فیلتر حاصل از تبدیل فوریه^۸، حاصل از تبدیل‌های کسینوسی یا موجک‌ها هدایت نمود. مطابق بررسی به‌عمل آمده در مآخذ مورد اشاره در مقدمه، از جمله بهترین انتخاب‌ها می‌تواند موجک‌ها باشد. تنها مشکل مدلسازی موجک‌ها به تأخیر بالای آنها بازمی‌گردد؛ یعنی از یک طرف برای پیاده‌سازی یک موجک با خواص مطلوب به تأخیر بالایی نیاز است و از طرف دیگر اعمال شرایط بازسازی کامل سبب می‌شود آزادی طراحی فیلتر نمونه برای کمترین کاهش باند توقف، محدود شود. در فیلترهای تبدیل فوریه^۹ گسسته^۹ نیز شرایط بازسازی کامل طراحی را به سمت فیلترهای با مرتبه بالا می‌کشاند. از سوی دیگر، تحقق شرایط بازسازی کامل نیز در این فیلترها ساده نخواهد بود. موارد ذکر شده سبب می‌شود جهت انتخاب به سمت فیلتر بانک‌های تبدیل کسینوسی گسسته^{۱۰} برود. نمونه‌هایی از این بانک فیلترها برای طراحی ارائه شده است که تحقق شرایط بازسازی کامل در آنها از سادگی خاصی برخوردار است. جالب است که این اتفاق در عین به‌کارگیری مرتبه‌های پایین برای فیلترهای نمونه به‌دست می‌آید. لذا با استفاده از این روش می‌توان بانک فیلتری تولید کرد که در عین داشتن شرایط مورد نیاز، تأخیر زیادی را نیز بر سیستم تحمیل نکند. در زمینه مدلسازی بانک‌های فیلتر تبدیل کسینوسی گسسته، یکی از روش‌های مطلوب تعیین مرتبه فیلترهای نمونه بر مبنای معادله^{۱۱} است.

$$N = 2mM \quad (1)$$

به طوری که در این رابطه M تعداد کانال‌ها و m مرتبه فیلتر است. در این بخش، پس از انتخاب تعداد کانال‌ها، انتخاب m به‌عنوان یک پارامتر طراحی است. نکته مهم در انتخاب این پارامتر، تعیین تأخیر کلی ایجاد شده در حلقه بسته به وسیله مرتبه فیلتر نمونه است. لذا در این انتخاب باید پارامترهای متنوعی را مورد توجه قرار داد. مطابق جدول توزیع فرکانس‌های ارتعاشی مدل اصلی سیستم که شامل سه منبع با فرکانس‌های متغیر از ۱ تا ۲/۵ هرتز، ۲ تا ۴/۵ و از ۴/۵ تا ۶/۵ هرتز می‌باشد و نیز زمان نمونه‌برداری مدلسازی، که برابر با ۰/۰۲ ثانیه است، مشخص می‌شود برای تحقق باندهای ۲/۵ هرتزی لازم است یک بانک فیلتر کسینوسی ۱۰ کاناله انتخاب شود. با این وجود، بررسی‌ها نشان می‌دهد که تقسیم‌بندی سیگنال به ۲۰ کانال پاسخ بهتری را در بر خواهند داشت. اما برای اینکه

شده و سیستم کنترل ارتعاشات بر اساس بانک فیلتر به سیستم قبلی اضافه می‌شود. عملکرد برخط و مستقیم بانک فیلتر می‌تواند ارتعاشات باندپهن ایجاد شده از سوی زیرسیستم‌های ارتعاشی را برطرف کند. بانک فیلتر با تحلیل سیگنال خروجی سیستم ناوبری ماهواره‌بر، که خصوصاً خروجی سیستم جیروسکوپ می‌باشد، ضمن تعیین دقیق محدوده فرکانس‌های ارتعاشی نامطلوب، امکان فیلترکردن و حذف آنها را فراهم می‌کند. در این میان، برای رفع تأخیر ایجاد شده به دلیل عملکرد بانک فیلتر از روش پیش‌بین اسمیت استفاده شده است.

این روش نسبت به فعالیت‌های مشابه دارای مزایایی است: اولاً از روش پردازش سیگنال به صورت برخط در حلقه کلی سیستم استفاده شده است که پیش از این عموماً از مجموعه روش‌های پردازش به صورت خارج خط^۶ استفاده می‌شد. همچنین در این مطالعه از روش کاهش تأخیر برای بهبود عملکرد سیستم پردازش استفاده شده است. اما با این حال، یکی از مزایای اصلی روش پیشنهادی این است که بلوک کنترل ارتعاشات کمترین تأثیر را بر سیستم اصلی کنترل وضعیت دارد.

این مقاله از پنج بخش تشکیل شده است: پس از بیان مقدمات در بخش نخست، در بخش دوم سیستم کنترل ارتعاشات ماهواره‌بر بر اساس بانک فیلتر مطرح شده است. در بخش سوم مدل دینامیکی ماهواره‌بر به اختصار آمده است. در بخش‌های چهارم و پنجم نیز شبیه‌سازی و نتایج مقاله ذکر شده است.

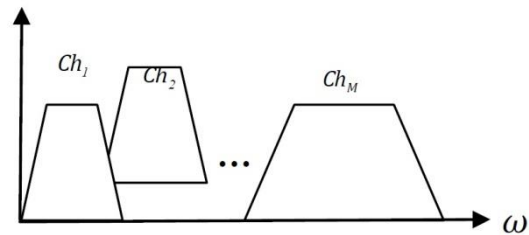
۲. کنترل ارتعاشات بر پایه راهبرد پردازش سیگنال

در روش کنترل ارتعاشات بر پایه پردازش سیگنال، تنها در بخش پس‌خور سیستم اصلی کنترل وضعیت که می‌تواند هر نوع روش کنترلی باشد، المان‌های پردازش قرار می‌گیرند و به حذف فعال فرکانس‌های نامطلوب ارتعاشی می‌پردازند. ابزار پردازش و نوع اعمال روش در این دیدگاه از اهمیت بسیاری برخوردار است.

۳. انتخاب ابزار پردازش سیگنال زیرباند مستقیم

در روش مستقیم کنترل ارتعاشات، بلوک پردازش سیگنال مستقیماً در پس‌خور سیستم اصلی کنترل قرار دارد و در واقع خروجی سیستم ناوبری را دریافت می‌نماید. لذا مسئله بازسازی کامل^۷ سیستم بانک فیلتر برخلاف روش غیرمستقیم (بدون تأخیر) اهمیت چشمگیری پیدا می‌کند؛ زیرا سیگنال پس‌خور پس از تحلیل و حذف نوفه باید

ریز کردن کانال ها سبب کاهش بازده سیستم نشود، می توان به جای بانک فیلتر یک شکل، از بانک فیلتر غیر یک شکل استفاده کرد؛ یعنی مطابق شکل ۲ مدلسازی یک بانک فیلتر ۱۱ کاناله که ۱۰ کانال آن ۱/۲۵ هرتز و یک کانال آن ۱۲/۵ هرتز از فرکانس نایکویست را در بر می گیرد.



شکل ۲. یک بانک فیلتر غیر یک شکل

توسط ناسبامر^{۱۱} در سال ۱۹۸۱ م مطرح شده است [۱۱]. حال اگر ضرایب یک فیلتر از نوع پاسخ ضربه محدود^{۱۲} نشان داده شود، برای استخراج ضرایب فیلترهای آنالیز و سنتز از معادلات ۲ و ۳ می توان بهره گرفت:

$$h_k(n) = 2hn \cos \left(\frac{\pi}{M} \left(k + \frac{1}{2} \right) \left(n - \frac{D}{2} \right) + (-1)^k \frac{\pi}{4} \right) \quad (2)$$

$$f_k(n) = 2hn \cos \left(\frac{\pi}{M} \left(k + \frac{1}{2} \right) \left(n - \frac{D}{2} \right) - (-1)^k \frac{\pi}{4} \right) \quad (3)$$

در این روابط $0 \leq n \leq N-1$ و $0 \leq k \leq M-1$ است. همچنین k شماره تعداد کانال ها، $h_k(n)$ ضرایب فیلتر آنالیز، $f_k(n)$ ضرایب فیلتر سنتز و D تأخیر ایجاد شده به وسیله بانک فیلتر است.

۵. جبران تأخیر بلوک فیلتر

روش پیش بین اسمیت از جمله روش های قدیمی است؛ روشی که هسته اولیه ابداع و به کارگیری آن در کنترل فرایندهای شیمیایی بوده است [۱۲]. وجود تأخیر زیاد در چنین فرایندهایی سبب شد که به کارگیری سیستم های حلقه بسته برای کنترل آنها با چالش حاشیه پایداری روبرو شود. روش ابتدایی اسمیت تا حد زیادی توانست این مشکل را جبران کند. روش اولیه اسمیت بر این مینا استوار است که تأخیر را به خارج حلقه هدایت می کند و حلقه بسته از تأخیر مصون می ماند. اگر قرار باشد یک سیستم با تأخیر در معرض کنترل حلقه بسته قرار گیرد، با توجه به احتمال مختل شدن پایداری آن، سیستم اصلی را می توان بر مبنای روش اسمیت اصلاح کرد. معادلات حلقه بسته برای این روش در ادامه آمده است. فرض می شود مدل یک سیستم با تأخیر T باشد، با به کارگیری روش اسمیت می توان نوشت:

$$H(z) = \frac{C(z)G(z)}{1 + C(z)G(z)} \quad (4)$$

در معادله ۴ مقدار $C(z)$ به صورت ۵ بیان می شود:

$$C(z) = \frac{\bar{C}(z)}{1 + \bar{C}(z)\hat{G}(z)(1 - z^{-T})} \quad (5)$$

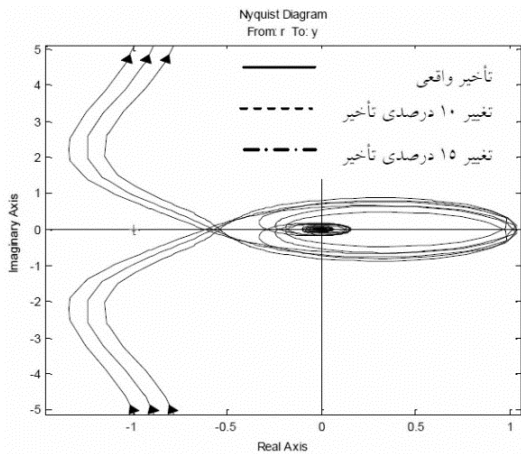
به طوری که در این رابطه $\bar{C}(z)$ کنترل کننده اصلی سیستم بدون ترکیب با روش اسمیت است. همچنین $\hat{G}(z)$ یک مدل دینامیکی از سیستم است که باید در دسترس باشد. اگر مدل انتخاب شده و میزان تأخیر صحیح تعیین شده باشند، تأخیر از حلقه بسته کنترل خارج می شود. مشکل اصلی روش اسمیت به دو پارامتر اصلی این روش بازمی گردد؛ یعنی تأخیر ایجاد شده (T) و مدل دینامیکی انتخاب شده $\hat{G}(z)$. اگر این مقادیر دقیق باشند و نامعینی در سیستم

برای انتخاب m باید بررسی شود که حلقه بسته سیستم اصلی نسبت به چه مقدار تأخیر ناپایدار می شود. به عنوان نمونه با انتخاب $m=1$ مرتبه فیلتر ۲۰ و تأخیر کلی مدار حدود ۲۵ تا ۳۰ گام معادل ۰/۵ تا ۰/۶ ثانیه خواهد شد. حال آنکه مدار کنترلی اصلی در حلقه بسته نسبت به چند گام تأخیر حساس است. لذا باید راهکار کلی دیگری مانند روش اسمیت برای جبران تأخیر ایجاد شده به کار گرفته شود. نکته قابل توجه اینکه خود این روش نیز روی مقاومت حلقه بسته اثر خواهد گذاشت و به طور کلی می بایست مقاوم بودن پایداری سیستم اصلی نسبت به تأخیر ایجاد شده را مورد بررسی قرار داد.

۴. بانک فیلتر کسینوسی

بانک فیلترهای مدوله شده کسینوسی به سیستم فیلترهایی گفته می شود که فیلترهای بخش آنالیز و سنتز آنها با استفاده از تبدیلات گسسته کسینوسی مدلسازی می شوند. چنین بانک هایی را معمولاً همان بانک فیلتر کسینوسی می نامند. به عبارت دیگر، برای طراحی چنین سیستم هایی ابتدا یک فیلتر نمونه پیشنهاد و با استفاده از روابط خاصی فیلترهای آنالیز و سنتز استخراج می شود. خاصیت مهم این روش این است که به جای طراحی هر یک از فیلترهای آنالیز و سنتز در سیستم های با تعداد کانال زیاد، کافی است پارامترهای فیلتر نمونه به گونه ای طراحی شوند که شرایط مورد نظر ارضا گردد. سابقه ارائه چنین بانک فیلترهایی در معرفی اولیه به فعالیت های مالور در سال ۱۹۹۰ و کوپیل پیلاوی و وای دیاناتان در سال های ۱۹۹۱ و ۱۹۹۲ م بازمی گردد [۱۰]. همچنین مدل کسینوسی بر مبنای فیلتر بانک های آینه تریبیعی نیز ارائه شده که این موضوع به طور مقدماتی

و پیش بین که آنها را SP-PID می‌نامند از مقاومت خوبی برخوردار بوده است.



شکل ۳. بررسی مقاوم بودن سیستم حلقه بسته

نسبت به تغییرات ۱۰ و ۱۵ درصدی تأخیر در روش SP

۶. فیلتر تطبیقی زیرباند

شاید بتوان گفت که یکی از بهترین شرایط برای به‌کارگیری فیلترهای تطبیقی استفاده از آنها در شرایط زیرباند است. در اینجا یک کاربرد جدید از این سیستم‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد و آن استفاده از فیلتر باریک زیرباند در مسیر پسخور یک سیستم کنترل حلقه بسته است. این عملیات برای حذف تک فرکانس ارتعاشی در هر زیرباند، از فیلترهای باریک^{۱۴} با الگوریتم‌های تطبیقی ارائه شده در مرجع [۱۵] استفاده می‌نماید. از این‌رو در هر باند، یک فرکانس ارتعاشی نامطلوب قابل حذف خواهد بود. علاوه بر مزایای کلی تحلیل‌های زیرباند، از جمله مزایای این روش، مسئله مدلسازی فیلترهای باریک به‌صورت موازی است. در تمام روش‌های کنترل ارتعاشات با بهره‌گیری از فیلترهای باریک، این فیلترها به‌صورت سری در مدار قرار می‌گیرند که این موضوع سبب می‌شود تأثیر نامطلوب فاز فیلترها با افزایش تعداد آنها بیشتر شود. اما در این چیدمان جدید به‌کارگیری فیلترها به‌صورت موازی سبب شده است که با افزایش تعداد، تأثیر کمتری بر فاز سیستم کلی نمایان گردد. تابع تبدیل یک فیلتر باریک به‌صورت $H(z) = f(z)/f(\alpha z)$ می‌باشد که در آن تابع f یک تابع دلخواه طراحی شده و α یک ضریب ثابت است. از طرف دیگر، این روش معایب روش آستانه مرزی را که در آن ممکن است سیگنال اصلی مطلوب نیز صدمه ببیند ندارد و فیلتر باریک با دقت خاصی تنها فرکانس نامطلوب را

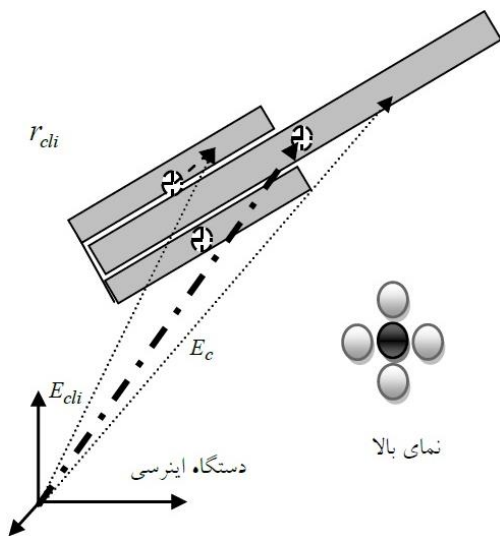
بروز نکند، عملکرد روش اسمیت مطلوب خواهد بود. اما مسلماً بروز برخی شرایط نامعینی در سیستم‌های دینامیکی سبب می‌شود که میزان مقاوم بودن سیستم کنترل به پارامترهای مختلف به‌عنوان چالشی جدی مطرح شود. از این‌رو تاکنون در فعالیت‌های متنوعی روش اسمیت برای مقاوم‌نمودن در مقابل نامعینی‌های مختلف و حتی نوفه‌ها اصلاح شده است [۱۳-۱۵].

در این مقاله برای حل مشکل ناپایداری سیستم یا عملکرد نامطلوب در حضور روش اسمیت از روش‌های اصلاح‌شده آن استفاده نشده است؛ بلکه با حفظ سادگی روش اصلی تلاش شده تا دو پارامتر اصلی مذکور؛ یعنی تأخیر و مدل نمونه، از دقت بالایی برخوردار بوده و در عین حال حدود این پارامترها به‌گونه‌ای طراحی شود که پایداری و عملکرد سیستم اصلی را با چالش مواجه نکند. از این‌رو، در گام نخست و به‌عنوان یکی دیگر از مزایای بانک فیلتر کسینوسی، برای اینکه بلوک پردازش سیگنال دارای تأخیر مشخصی باشد، از مدلی از بانک فیلترهای کسینوسی استفاده شده که دارای گام تأخیر کاملاً مشخصی خواهند بود. البته بخش‌های آنالیز و سنتز به‌طور جداگانه فاز خطی نیستند، اما ترکیب آنها یک بانک فیلتر فاز خطی با تأخیر معین را می‌دهد. لذا دامنه نامعینی در تأخیر ایجادشده بسیار محدود و ناچیز است. در گام دوم، برای تعیین مدل دینامیکی مورد نیاز، که باید کاملاً رفتاری یکسان با مدل اصلی داشته باشد، برای ماهواره‌بر می‌توان راهکار مدل مرجع را ارائه نمود. در این راهکار، با ارائه مدل مرجع صلب سیستم که مدلی با قابلیت اطمینان بالاست، چالش اصلی مدل دینامیکی برطرف می‌شود. به‌عبارت دیگر بلوک حذف ارتعاشات در صورت عملکرد مطلوب، سیستم اصلی را به‌سمت مدل صلب رهنمون می‌نماید. لذا رفتار مدل دینامیکی صلب و مدل اصلی به‌هم نزدیک می‌شود و این تضمین عملکرد روش اسمیت را به‌همراه دارد. برای اطمینان از مقاوم بودن سیستم نسبت به تأخیر و تغییرات بهره، در یکی از فعالیت‌ها بررسی میزان مقاومت سیستم کنترل مطابق شکل ۳ انجام شده است تا مشخص شود افزایش تأخیر و بهره چه تأثیری بر پایداری سیستم دارد [۱۶].

در این شکل نمودار نایکوئیست سیستم حلقه باز برای تأخیرهای مختلف رسم و حساسیت پایین سیستم نسبت به این تأخیر نمایش داده شده است. چون سیستم کنترل اصلی در اینجا یک کنترل‌کننده بهره ثابت، مشتق‌گیر و انتگرالگیر^{۱۳} جدول‌بندی شده، با این بررسی مشخص شده است که مجموع این کنترل‌کننده

$$T_c = \frac{1}{2} \int \frac{dE_c^T}{dt_1} \frac{dE_c}{dt_1} dm^c \quad (14)$$

$$T_{cli} = \frac{1}{2} \int \frac{dE_{cli}^T}{dt_1} \frac{dE_{cli}}{dt_1} dm^{cli} \quad (15)$$



شکل ۴. نمای کامل برداری سیستم ماهواره‌بر

انرژی پتانسیل نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$U = \frac{1}{2} \int EI \left\{ \left(\frac{\partial^2 e_y}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 e_z}{\partial x^2} \right)^2 \right\} dx \quad (16)$$

به طوری که در این رابطه R بردار جابه‌جایی مرکز جرم در دستگاه اینرسی، \bar{r}_c بردار جابه‌جایی المان‌های جرمی هسته، \bar{r}_{0c} بخش صلب همان بردار، \bar{e}^c بخش غیرصلب همان بردار، اندیس‌های cl مربوط به کلاسترها و e_y و e_z بردار جابه‌جایی الاستیک المان‌های سیستم و EI سختی خمشی هستند. در نهایت معادلات کلی دینامیکی سیستم در حالت غیرخطی با استفاده از روش لاگرانژ به صورت ۱۷ استخراج خواهد شد:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (17)$$

به طوری که $L = T - U$ و Q نیروی تعمیم‌یافته است. پس از استخراج معادلات غیرخطی فرایند خطی‌سازی آنها با استفاده از نظریه اغتشاشات کوچک انجام شده است. در واقع سیستم خطی به صورت ترکیبی از دینامیک اصلی بانضمام سه منبع ارتعاشی با فرکانس‌های ۱ هرترز مربوط به مود اول ارتعاشی، ۱/۵ هرترز مربوط به مود دوم ارتعاشات خمشی و ۶ هرترز مربوط به مود سوم ارتعاشی می‌باشد. همچنین فرکانس ۸ هرترز مربوط به مود چهارم است که

حذف می‌کند. لذا می‌توان گفت اگر سیستم بانک فیلتر به‌گونه‌ای مطلوب طراحی شده باشد روش فیلترهای باریک تطبیقی زیرباند، یکی از بهترین روش‌ها برای حذف ارتعاشات خواهد بود. حال می‌توان صورت اصلاح‌شده‌ای از روش گرادیان به صورت زیر ارائه کرد و بر مبنای آن شناسایی فرکانس ارتعاشی با روش مدل مرجع در زیرباند را پیگیری نمود.

$$e = y - y_m \quad (6)$$

$$J = \frac{1}{2} \sum \left(\frac{e(n)^2}{2(2 - K_0(n))} \right) \quad (7)$$

$$K_0 = -\cos(\hat{\omega}) \quad (8)$$

با این تابع هزینه الگوریتم بازگشتی گرادیان برای شناسایی K_0 ، که همان تابعی از فرکانس مورد نظر خواهد بود، به صورت رابطه ۹ استخراج می‌گردد:

$$K_0(n+1) = K_0(n) - \gamma \frac{e(n)y(n-1)(2 - K_0(n)) - e(n)^2}{2(2 - K_0(n))^2} \quad (9)$$

به طوری که در این رابطه γ یک ضریب ثابت است. باید توجه داشت که تمامی عملیات شناسایی در فضای زیرباند مدلسازی می‌گردد. به عبارت دیگر، زمان‌های نمونه برداری مطابق زیرباند‌ها و در محدوده هر زیرسیستم ارتعاشی تعیین می‌شوند.

۷. مدل مورد بررسی

مدل مورد بررسی در این مقاله یک ماهواره‌بر انعطاف‌پذیر با چهار بوستر جانبی، شامل ترکیبی از زیرسیستم‌های ارتعاشی و تنوع طیف فرکانسی است. این سیستم مطابق شکل ۴ دارای زیرسیستم‌های ارتعاشی نظیر سازه انعطاف‌پذیر مرکزی و کلاسترهاست که در مدلسازی خطی مورد توجه قرار گرفته است. در این بررسی، برای صرف‌نظر از اضافه شدن حجم زیاد معادلات دینامیکی و روند خطی‌سازی تنها به کلیات استخراج معادلات دینامیکی اشاره خواهد شد. مطابق شکل ۴ بردار جابه‌جایی المان‌ها به صورت زیر بیان می‌شود.

$$E_C = R + \bar{r}_c \quad (10)$$

$$E_C = R + \bar{r}_{0c} + \bar{e}^c \quad (11)$$

$$E_C = R + \bar{r}(J_i) + \bar{r}_{cli} \quad (12)$$

$$\bar{r}_{cli} = \bar{r}_{0cli} + \bar{e}^{cli} \quad (13)$$

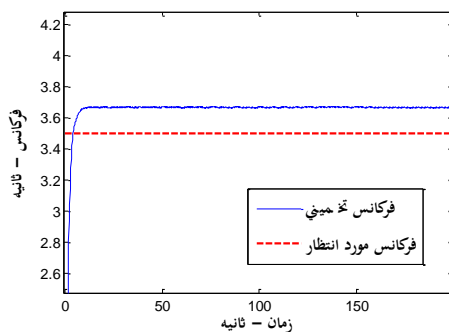
حال انرژی جنبشی سیستم به دست خواهد آمد:

فرکانس دومین مود خمشی آن را نمایش می‌دهند. در شکل‌های بعدی، سرعت زاویه‌ای و نوسانات عملگر مورد توجه قرار گرفته است. در این زمینه شکل ۱۰ کاهش قابل توجه نوسانات ارتعاشی سه منبع همزمان در سرعت زاویه‌ای کانال پیچ را نمایش می‌دهد. در این شکل واضح است که نبود سیستم ارائه‌شده به واگرایی نوسانات منجر خواهد شد. شکل ۱۱ نیز این موضوع را برای عملگر این کانال نمایش می‌دهد. اهمیت بررسی عملگر سیستم از این جهت است که نوسانات این زیرسیستم اگر به واگرایی هم منجر نشود، سبب بروز خستگی در سازه‌ها خواهد شد و قابل توجه خواهد بود. سیستم کاهش ارتعاشات از بروز این خستگی ممانعت می‌کند. نکته دیگر در این نمودار اینکه عملکرد کلی رفتار سیستم گذرا از قبیل زمان نشست و ماکزیمم فراجش با وجود به‌کارگیری روش اسمیت و نیز اعمال بلوک بانک فیلتر تغییر محسوسی نداشته است. اختلافات جزئی حاصل از شناسایی فرکانس‌ها مربوط به عملکرد سیستم شناسایی در حلقه بسته است و در واقع، مقدار پیش‌بینی شده فرکانس‌های ارتعاشی سه‌گانه مربوط به حلقه باز بوده که مقدار جزئی انحراف در عملکرد حلقه بسته قابل پیش‌بینی است. از طرفی مقدار پیش‌بینی شده فرکانس‌ها با توجه به عملکرد تکین زیرسیستم ارتعاشی به‌دست آمده که مسلماً در تداخل با سایر زیرسیستم‌ها و در عملکرد حلقه بسته سیستم، این مقدار دچار تغییر جزئی خواهد شد. مشخصات نوفه اندازه‌گیری بوده و به‌صورت گوسی با مقدار واریانس 0.001 لحاظ شده است. از نکات قابل توجه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده ظاهری وجود چند فرکانس ارتعاشی در سیگنال خروجی است.

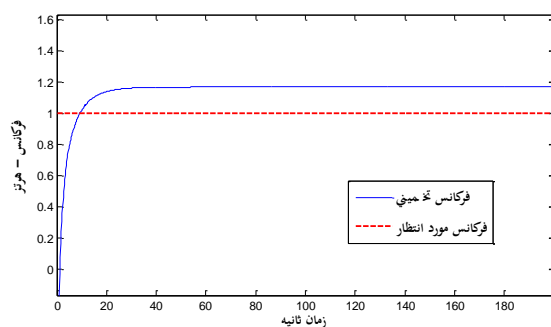
به‌دلیل پهنای باند کل سیستم تأثیری بر دینامیک مورد بررسی نخواهد داشت. این طیف فرکانسی بر اساس اطلاعات تجربی تست‌های پروازی و سازه‌ای به‌دست آمده است.

۸. نتایج شبیه‌سازی

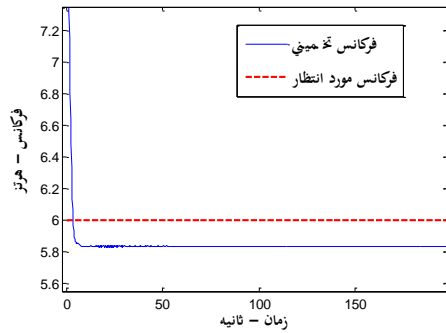
مدلسازی خطی کانال پیچ سیستم ارتعاشی ماهواره‌بر در متلب^{۱۵} با روش‌های عددی انجام شده است. نتایج بررسی روش کنترلی پیشنهادی در نمودارهای پیش‌رو مورد توجه قرار گرفته است. در شکل‌های ۵ تا ۹ روند شناسایی فرکانس‌های ارتعاشی در زیرباند مشاهده می‌شود. در این نمودارها تأثیر نوفه سفید گوسی بر شناسایی نمایش داده شده است. باید توجه داشت که نوسانات اندک موجود در شناسایی فرکانس‌ها مربوط به تغییرات نرخ نمونه‌برداری در زیرباند و سایر فعالیت‌های مشابه در باند محدود و در عملکرد کلی سیستم بی‌تأثیر است. نکته جالب توجه در تأثیر نوفه بر شناسایی فرکانس‌ها اینکه اگرچه حضور نوفه دامنه نوسانات را افزایش می‌دهد، تأثیر آن به‌عنوان تحریک‌کننده پایا سبب بهبود زمان همگرایی شده است. در این نمودارها مقادیر تخمینی که پیش‌بینی می‌شده برای فرکانس‌ها وقوع یابد، با توجه به برخی نمونه‌های مشابه سیستمی ارائه شده‌اند تا منبع خوبی برای مقایسه شناسایی باشند. همچنین باید توجه داشت که این نمودارها برای یک مقطع خاص پروازی ارائه شده است. در کل سیستم پروازی و در طول پرواز روشن است که مقادیر قابل پیش‌بینی و تخمینی فرکانس‌ها تغییر خواهند کرد. مطابق توضیحات ارائه‌شده، شکل ۵ فرکانس مربوط به اولین مود ارتعاشی را، که فرکانسی کوچک است، نمایش می‌دهد. شکل ۶ فرکانس اولین مود خمشی سیستم و شکل ۸



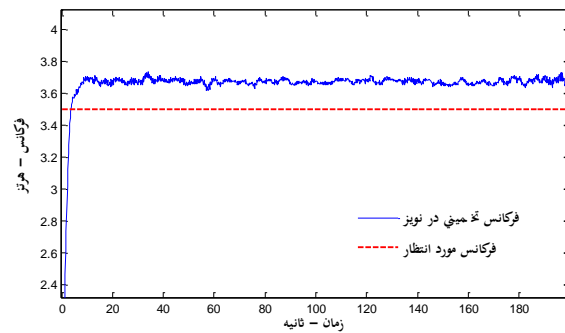
شکل ۶. شناسایی بدون نوفه فرکانس دوم ارتعاشی در زیرباند



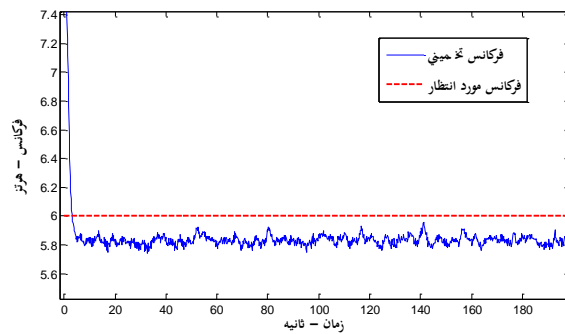
شکل ۵. شناسایی بدون نوفه فرکانس اول ارتعاشی در زیرباند



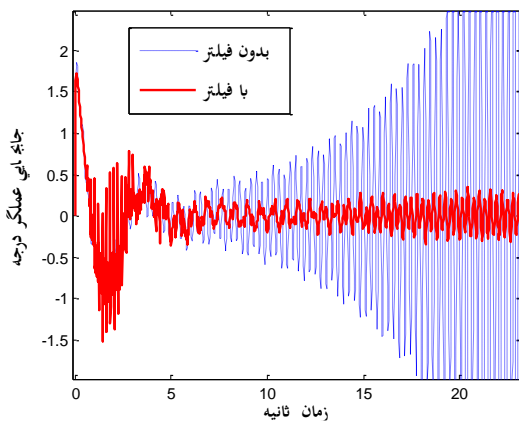
شکل ۸. شناسایی بدون نوبه فرکانس سوم ارتعاشی در زیرباند



شکل ۷. تأثیر نوبه بر شناسایی فرکانس دوم ارتعاشی در زیرباند

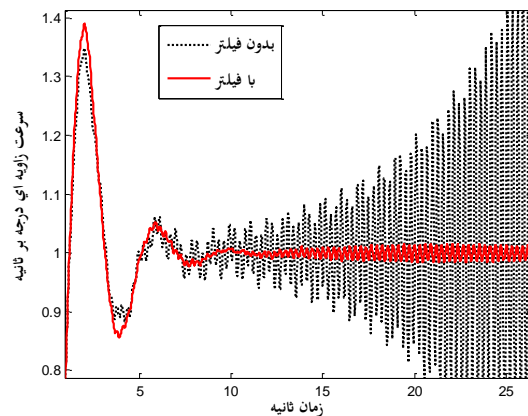


شکل ۹. تأثیر نوبه بر شناسایی فرکانس سوم ارتعاشی در زیرباند



شکل ۱۱. کاهش نوسانات ارتعاشی

در عملگر کانال پیچ با استفاده از روش



شکل ۱۰. کاهش نوسانات ارتعاشی در سرعت

زاویه‌ای پیچ با استفاده از روش فیلتر زیرباند مستقیم

۹. نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای کنترل ارتعاشات یک سیستم ارتعاشی، که شکل گرفته از حداقل سه زیرسیستم ارتعاشی دیگر است، از راهبرد کاهش ارتعاشات زیرباند مستقیم استفاده شده است. نحوه پیاده‌سازی این راهبرد در این بررسی بر اساس نگاه زیرباند و تحقق فیلترهای زیرباند انجام شده است. نوآوری این مقاله در زمینه مدلسازی با نگاه زیرباند به این موضوع بازمی‌گردد که در این دیدگاه

بلوک زیرباند به‌طور مستقیم در حلقه کنترل قرار گرفته و برای حل مشکل تأخیر مسقیم در حلقه کنترل، از روش ترکیبی اسمیت و مدل مرجع استفاده شده است. مجموع بلوک پردازش و شناسایی زیرباند به انضمام روش ترکیبی اسمیت، راهبرد کنترل ارتعاشات مطلوبی در محیط زیرباند ایجاد می‌نماید که در این مقاله روی یک ماهواره بر انعطاف‌پذیر چندجسمی پیاده شد. نکته مهم اینکه ماهیت بروز

کاهش تحریک به‌خوبی برای کنترل ارتعاشات یک سیستم شامل چند زیرسیستم ارتعاشی قابل کاربرد است و از مزایای روش مستقیم این راهبرد با توجه به کاربرد بلوک اسمیت می‌توان استفاده کرد.

تحریک ارتعاشی به‌دلیل پهنای باند عملگرهای سیستم است که موجب می‌شود در تلاقی با سایر زیرسیستم‌ها احتمال بروز تشدید زیاد شود. نتایج شبیه‌سازی سیستم کنترل نشان می‌دهد که راهبرد

۱۰. مأخذ

- [1] Zarafshan, P., S.S.A. Moosavian. "Adaptive Hybrid Suppression Control of a Wheeled Mobile Robot with Flexible Solar Panels." *Modares Mechanical Engineering* 13. 5, 2013, pp. 197-202, (In Persian).
- [2] Khoshnood, A.M., H. Moradi. "Dynamics modeling and active vibration control of a satellite with flexible solar panels." *Modares Mechanical Engineering* 14. 1, 2014, pp. 197-202. (in Persian).
- [3] Zarafshan, P., S.A.A. Moosavian, E.G. Papadopoulos. "Adaptive hybrid suppression control of space free-flying robots with flexible appendages." *Robotica*. 760. 10, 2014, pp. 45-68.
- [4] Simpson R.J.S., R. Palacios R., H. Hesse, P. Goulart. "Predictive control for alleviation of gust loads on very flexible aircraft", 55th AIAA/ASME/ASCE/AHS/SC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. National Harbor, MD, United States, 2014.
- [5] Khoshnood, A. M. "Vibration Control of a Flexible Structure by Reconstruction of Control Input Based on Estimation of Undesired Vibration Frequencies." *Modares Mechanical Engineering*. 14, 1, 2014, pp. 197-202. (in Persian).
- [6] Khoshnood, A. M., J. Roshanian, A. Khaki-sedigh. "Model Reference Adaptive Control for a Flexible Launch Vehicle." *IMEchE J. systems and control engineering.*, 222 1, 2008, pp. 49-55.
- [7] Micheau, P., P. Coirault. "Adaptive controller using filter banks to reject multi-sinusoidal disturbance." *Automatica*, 36, 2000, pp. 1659-1664.
- [8] Malvar, H. S. "Modified QMF filter banks with perfect reconstruction." *Electronic Letters*, 26, 1990, pp. 906-907.
- [9] Chaplais, F. C., P. Tsiotras, D. Jung. "On-Line Wavelet Denoising with Application to the Control of a Reaction Wheel System." *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, AIAA Paper 04-5345, Providence, 2004.
- [10] Koilpillai, R. D., P.P. Vaidyanathan. "New results on cosine-modulated FIR filter banks satisfying perfect reconstruction." *Proceeding of IEEE international Conference on Acoustic Speech and Signal processing*, 1991, pp. 1793-1796.
- [11] Nussbaumer, H. J. Pseudo. "QMF filter bank", *IBM Tech.*, disclosure Bulletin, 24. 6, 1981, pp. 3081-3087.
- [12] Smith, O. J. M., A. "controller to overcome dead time." *ISA Journal of Instrument Society of America*. 6, 1959, pp. 28-33.
- [13] Panda, R. C., S. B. Hung, C. C. Yu. "An Integrated Modified Smith Predictor with PID Controller for Integrator plus Dead time." *Processing of Industrial Engineering Chem. Res.* 45, 2006, pp. 1397-1407.
- [14] Zheng, D., J. Fang, Z. Ren. "Modified Smith predictor for frequency identification and disturbance rejection of single sinusoidal signal." *ISA Transactions* 49, 2010, pp. 95-105.
- [15] Jafari, A.A., A.M. Khoshnood. "Investigation on the Active Control of Multi Vibration Subsystems via Subband Adaptive Filtering", 2nd International Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE, China, 2011.
- [16] Khoshnood, A.M. "Active vibration control of a flexible clustered launch vehicle", Ph.D. Thesis, K. N. Toosi university of Technology, 2011.

-
1. resonance
 2. clusters
 3. sub-band
 4. F. C. Chaplais
 5. on-line
 6. off-line
 7. perfect reconstruction
 8. Fourier transform
 9. discrete Fourier transform
 10. discrete Cosine transform
 11. Nussbaumer
 12. finite impulse response
 13. proportional-derivative-integrated (PID)
 14. notch
 15. Matlab[®]