

اندازه‌گیری و مدل‌سازی اغتشاشات چرخ عکس‌العملی ماهواره با استفاده از سنسور شتاب و نیرو

آرمان صحت‌نیا، فرزاد هاشم‌زاده و حمید قوچی اسکندر

در ساختار رانشگرهای فضایی، موقعیت‌یابی با گشتاور و سرعت زاویه‌ای مطلوب توسط چرخ‌های عکس‌العملی انجام می‌شود که یکی از مهم‌ترین پلتفرم‌های کاربردی هستند که به راحتی تحت تأثیر اغتشاشات قرار می‌گیرند. بنابراین مدل‌سازی دقیق اغتشاشات وارد شده بر چرخ‌های عکس‌العملی و نهایتاً تخمین تأثیر آنها بر روی متغیرهای حالت سیستم (همانند سرعت‌های خطی و زاویه‌ای در تمامی جهات) امری ضروری است. نهایتاً با اطلاعات به دست آمده توسط تخمین‌گرها، تأثیر اغتشاشات بر سیستم و منابع نقص قابل تحلیل خواهند بود. در تحقیقات اخیر، کیم و همکارانش [۱] مدل اغتشاشات را از روش تست ارتعاشات و با به کارگیری مدل تحلیلی توسعه‌یافته حول یک محور به دست آورده و با استفاده از مثال‌های عددی و تست‌های عملی اعتبارسنجی نموده‌اند. آقاولاری و ایران‌زاده [۲] با بسط مدل تحلیلی غیرخطی هارمونیک چرخ عکس‌العملی (عامل عدم تعادل چرخ)، تمامی هارمونیک‌هایی که سبب تقویت اغتشاش می‌شوند را مشخص نمودند. در راستای مدل‌سازی اغتشاشات، چرخ‌های عکس‌العملی لی ماینه فیوک [۳] مدل بسیار جامع‌تری را با در نظر گرفتن اثرات بیرینگ‌ها و ساختار قسمت بالایی چرخ‌ها (Housing Structure) به همراه کلیه روابط ارائه داده است. مدل ارائه‌شده دارای ۵ درجه آزادی است و سیستم دیسک و شفت با دو عدد بلبرینگ در کنار هم قرار دارند. خروجی اصلی این مدل، تئوری فرکانس رزونانس سیستم می‌باشد که با آزمایش بر روی چرخ آزمایشگاه بردفورد اعتبارسنجی شده است. در این اعتبارسنجی، تست رزونانس چرخ انجام شده و داده‌ها در مدل ترکیبی آمده‌اند. مدل تحلیلی ارائه‌شده در کار آقای وارول [۴] قادر است نیروها و گشتاورهایی را مدل کند که فرکانسی برابر با فرکانس دوران چرخ داشته باشند. در این مدل با وجود پیچیدگی کمتر نسبت به روش‌های قبلی (اضافه‌شدن اغتشاشات به صورت توابع نیروی هارمونیک)، نیروها و گشتاورهای اغتشاشی امکان وقوع در فرکانس‌هایی متفاوت با فرکانس دوران چرخ را دارند. از این رو پارامترهای به دست آمده از مدل تجربی با مدل تحلیلی تلفیق شده و مدل تحلیلی بسط‌یافته را تشکیل داده است. در کار دیگر، چیا لیو و همکارانش [۵] مدل اغتشاش چرخ عکس‌العملی را با آنالیز لرزش و تست‌های اعتبارسنجی برای دینامیک سیستم به دست آوردند. در این روش آنها تأثیرات اغتشاش را با محدودکردن سرعت چرخ عکس‌العملی در پایین‌ترین مقدار خود، بررسی نمودند. ویلیام و همکارانش [۶] در پژوهشی، روشی برای مقابله با عیب و اغتشاشات پیش‌آمده در یک چرخ عکس‌العملی را ارائه دادند. آنها برای بازسازی عیب و اغتشاشات برای ورودی‌های نامعین از یک رویتگر مد لغزشی استفاده نموده‌اند. در

چکیده: چرخ عکس‌العملی، یکی از حساس‌ترین ادوات مربوط به رانشگرهای فضایی است که به راحتی دستخوش اغتشاشات می‌شود. حفظ وضعیت ماهواره و توانایی در کنترل آن به دلیل پرهزینه بودن پروژه‌های طراحی و ساخت، یکی از مهم‌ترین مسایل مطرح‌شده این روزها می‌باشد. برای بهبود این روند، شناسایی و مدل‌کردن اغتشاشات و تحلیل تأثیرات آن بر پارامترهای سیستم جهت شناسایی و نقطه‌یابی نقص، از اهمیت بسیاری برخوردار هستند. در نتیجه شناسایی و تخمین دقیق اغتشاشات وارد شده بر چرخ‌های عکس‌العملی و بررسی تأثیر این ورودی‌های نامعین بر متغیرهای حالت سیستم، امری ضروری برای آشکارشدن وضعیت داخلی فضاپیما و شناسایی نقص آن است. به همین سبب در این مقاله از یک رویتگر جدید جهت تخمین بردار ورودی نامعین اغتشاش و بردار حالت سیستم استفاده شده است. در این راستا با در نظر گرفتن دینامیک میکرواغتشاش متغیر با زمان آنبالانس چرخ، ماتریس‌های طراحی رویتگر پیشنهادی در هر لحظه از زمان را با انجام یک سری محاسبات نامساوی‌های ماتریسی (LMI) به دست می‌آوریم که همگرایی و پایداری خطای تخمین این روش بر اساس قضیه لیاپانوف اثبات گردیده است. سپس نتایج طی یک سری شبیه‌سازی در نرم‌افزار Matlab با مشخصه تخمین ورودی بردار نامعین و بردار حالت مدل میکرواغتشاش، در بخش چهار ارائه می‌شوند.

کلیدواژه: چرخ عکس‌العملی، رویتگر، نامساوی‌های ماتریسی، ورودی نامعین.

۱- مقدمه

امروزه تحقیقات در زمینه رانشگرهای فضایی، جزء یکی از اولویت‌های پژوهشی دنیا به شمار می‌آید. در سال‌های اخیر سرمایه‌گذاری‌های سنگین در این زمینه، نشان‌دهنده اهمیت اجرای این پروژه‌ها می‌باشد. ماهواره‌ها به عنوان یکی از قسمت‌های اصلی رانشگرها حساسیت بسیار بالایی دارند. میزان کارایی ماهواره‌ها جهت انجام مأموریت بستگی زیادی به میزان ثبات ماهواره در وضعیت مطلوب دارد. حتی ارتعاشات بسیار کوچک هم می‌تواند تأثیر منفی در کیفیت پردازش و ارسال اطلاعات ماهواره داشته باشد و همان طور که می‌دانیم این ارتعاشات ممکن است به وسیله سیستم‌های مکانیکی یا حسگرهایی که در ماهواره نصب شده‌اند، ایجاد شود.

این مقاله در تاریخ ۲۸ مهر ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۳۰ دی ماه ۱۴۰۰ بازنگاری شد.

آرمان صحت‌نیا (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، (email: a.sehat@tabrizu.ac.ir).

فرزاد هاشم‌زاده، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، (email: hashemzadeh@tabrizu.ac.ir).

حمید قوچی اسکندر، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران (email: hamideskandar@gmail.com).

۲- توصیف دینامیک سیستم

قسمت دینامیکی چرخ عکس‌العملی دارای یک ساختار متقارن است و جهت مدل‌سازی عملگر چرخ عکس‌العملی، روتور با یک دیسک صلب بر روی شفت به همراه دو عدد بیرینگ در کناره آن مدل می‌شود. از فنر و دشباهت دمپر جهت نشان‌دادن سختی و دمپینگ هر یک از بیرینگ‌ها استفاده می‌شود و انتهای هر یک از بیرینگ‌ها از طریق روتور به شفت متصل می‌گردد [۱۷] و [۱۸].

جهت مدل‌سازی حرکت چرخ در فضای سه‌بعدی با استفاده از دستگاه مختصات بدنه چرخ و دستگاه مختصات مرجع که به صورت ثابت بر روی مرکز گرانش چرخ و موازی با چرخش در راستای محور Z قرار داده شده است، زوایای دوران اویلر (چرخش، خم و گردش) در (۱) در جهات مختلف چرخش دیسک (روتور) مشخص می‌شوند. با در نظر گرفتن سرعت چرخ به هر میزان مشخص، شتاب روتور در 5 درجه آزادی متناظر با معادلات حرکت چرخشی و انتقالی به دست می‌آید. معادلات حرکت با استفاده از معادله لاگرانژ استخراج شده و با در نظر گرفتن درجه آزادی دوران چرخ در راستای مختلف، معادله اویلر لاگرانژ به دست می‌آید.

در سامانه‌های مکانیکی معیوب از جمله مواردی که حین آنالیز فرکانسی (داده‌کاوی) باعث تبدیل سیگنال‌های اغتشاشی به مشخصه‌های فرکانسی منحصر به فرد می‌شود، عدم تعادل جرمی و غیر هم راستا بودن محورهای موازی می‌باشند. این واقعه در چرخ عکس‌العملی به صورت آنبالانسی دینامیکی و استاتیکی ظاهر می‌شود. آنبالانسی استاتیکی و دینامیکی (توسط جرم‌های m_s و m_d مدل شده و در ماتریس $[Mub]$ ظاهر شده‌اند) در عمل باعث ایجاد فاصله و زاویه بین محور اینرسی و محور دوران شده (شکل ۱) که عامل اصلی خارج شدن چرخش روتور از محور دوران است که نهایتاً موجب ایجاد نیرو و گشتاورهای اغتشاشی (لرزشی) وارد شده به چرخ عکس‌العملی می‌شوند. بدین ترتیب معادله حرکت چرخ آنبالانس از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹].

$$[Mub]a + [Cub(\Omega, t)]v + [Kdynamic]u = [U(\Omega, t)] \quad (1)$$

$$a = [\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \ddot{\theta}, \ddot{\phi}] \quad (2)$$

$$v = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\theta}, \dot{\phi}] \quad (3)$$

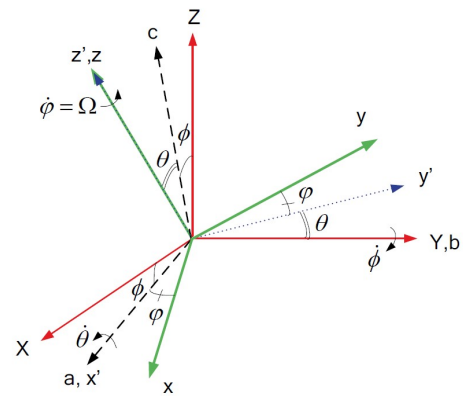
$$u = [x, y, z, \theta, \phi] \quad (4)$$

که $t \in R^n$ و Ω به ترتیب زمان و سرعت چرخش، ماتریس $[Mub]$ شامل جرم کل چرخ و ممان اینرسی آن، $[Cub(\Omega, t)]$ ماتریس دمپینگ سیستم و $[Kdynamic]$ ماتریس سختی فنر می‌باشد. هنگامی که چرخ در حالت تعادل باشد، سمت راست (۱) برابر با بردار صفر است اما در حالتی که آنبالانسی استاتیکی و دینامیکی وجود داشته باشد، سمت راست معادله حرکت شامل برداری از هارمونیک‌های اصلی اغتشاشات مکانیکی (نیرو و گشتاور) می‌شود [۲۰].

ابتدا فرم فضای حالت سیستم چرخ عکس‌العملی از روی (۱) و تشکیل بردار حالت x توسط بردارهای a ، v و u معرفی شده در (۲) تا (۴)، به شکل زیر بیان می‌گردد

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ -[Mub]^{-1}Kdynamic(\Omega) x - [Mub]^{-1}Cub(\Omega) x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{x} \\ [Mub]^{-1}Cub(\Omega) \end{bmatrix} = [U(\Omega, t)] \quad (5)$$

$$x = [x, y, z, \theta, \phi, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\theta}, \dot{\phi}]^T$$



شکل ۱: زوایای اویلر و چرخش روتور [۲].

این روش از اساس لیاپانوف^۱ برای تضمین همگرایی رویتگر به مقادیر واقعی استفاده شده که با در نظر گرفتن نوع رویتگر، دارای محاسباتی پیچیده می‌باشد. حامد یادگاری و همکارانش [۷] در پژوهش خود برای جبران عیب سیستم از نوعی رویتگر که ضرایب آنها بر اساس Tradeoff طراحی می‌شوند، جهت تخمین اغتشاش و تأثیرات آنها بر سیستم چرخ عکس‌العملی استفاده نموده‌اند.

همان طور که می‌دانیم، حفظ وضعیت ماهواره و توانایی در کنترل وضعیت آن به دلیل پرهزینه بودن و پیچیدگی پروژه‌های طراحی و ساخت، یکی از مهم‌ترین مسایل مطرح‌شده این روزها می‌باشد [۸] و [۹]. برای بهبود این روند، شناسایی و مدل‌کردن اغتشاشات و تحلیل تأثیرات آن بر متغیرهای سیستم جهت شناسایی و نقطه‌یابی نقص از اهمیت بسیاری برخوردار است [۱۰] تا [۱۲]. تحلیل سیستم چرخ عکس‌العملی با احتساب حضور اغتشاشات و تأثیر آنها بر متغیرهای سیستم، پیچیدگی‌هایی را به همراه دارد که تحلیل انجام‌شده را به سیستم واقعی نزدیک‌تر می‌کند که عموماً در بسیاری از تحقیقات کنترلی از آن چشم‌پوشی می‌شود [۱۳] تا [۱۵]. همچنین عمده‌تأ از داده‌های واقعی در تحلیل سیستم چرخ عکس‌العملی استفاده نشده است [۱۴] تا [۱۶].

در این مقاله، مدل اغتشاشات و تخمین تأثیر آنها بر روی متغیرهای سیستم چرخ عکس‌العملی بدون نیاز به دستگاه شناسایی اغتشاشات بررسی گردیده است. در ابتدا با توصیف و شناسایی چرخ عکس‌العملی موجود، دینامیکی فضای حالت سیستم با حضور اغتشاشات، مدل شده است. سپس با توصیف "رویتگر با ورودی نامعین"، اساس روند تخمین با در نظر گرفتن ورودی اغتشاشات به عنوان ورود نامعین، تشریح گردیده و سپس با ارائه طراحی "رویتگر ورودی نامعین توسعه‌یافته" برای مدل چرخ عکس‌العملی موجود، روند شناسایی اغتشاشات و تخمین تأثیر آنها بر پارامترهای اصلی سیستم ارائه شده است. در ادامه، با استناد بر قضایای اثبات‌شده، ماتریس‌های طراحی رویتگر پیشنهادی با انجام یک سری محاسبات نامساوی‌های ماتریسی (LMI) به دست می‌آیند که همگرایی و پایداری خطای تخمین این روش بر اساس قضیه لیاپانوف اثبات شده است. نهایتاً نتایج حاصل از تخمین اغتشاشات و پارامترهای متأثر سیستم بر اساس داده‌های تجربی چرخ عکس‌العملی موجود، شبیه‌سازی گردیده تا بر اساس این نتایج، تحلیل‌های لازم در راستای شناسایی نقص انجام شود.

جهت طراحی در ادامه بیان می‌گردد.

اگر سیستم خطی چرخ عکس‌عملی را به شکل زیر در نظر بگیریم

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A \cdot x(t) + F \cdot v(t) \\ y(t) &= C \cdot x(t) + G \cdot v(t) \end{aligned} \quad (۹)$$

که در آن $x \in R^n$ بردار حالت سیستم، $v \in R^h$ ورودی نامعین و $y \in R^p$ خروجی سیستم باشد و همچنین با توجه به $A \in R^{n \times n}$ ، $F \in R^{n \times h}$ ، $C \in R^{p \times n}$ ، $G \in R^{p \times h}$ ، بردار حالت جدیدی به صورت $\xi(t) = [x^T(t), v^T(t)]$ معرفی می‌شود. لذا سیستم (۹) به صورت زیر قابل تبدیل است

$$\begin{aligned} E \dot{\xi} &= \bar{A} \xi(t) \\ y(t) &= \bar{C} \xi(t) \\ \bar{A} &= [A, F] \\ \bar{C} &= [C, G] \\ E &= [I_n, 0] \end{aligned} \quad (۱۰)$$

در ادامه رُویتگر پیشنهادی و نحوه طراحی آن شرح داده می‌شود. رُویتگر کاهش مرتبه یافته با دینامیک زیر را در نظر بگیرید

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= N \cdot z(t) + L \cdot y(t) \\ \bar{\xi}(t) &= Jz(t) + Hy(t) \end{aligned} \quad (۱۱)$$

که در آن $z(t) \in R^{n+h-p}$ حالت رُویتگر و $\bar{\xi}(t)$ تخمین $\xi(t)$ است. ماتریس‌هایی که باید طراحی شوند عبارت هستند از: $L \in R^{(n+h-p) \times p}$ ، $N \in R^{(n+h-p) \times (n+h-p)}$ ، $J \in R^{(n+h) \times (n+h-p)}$ و $H \in R^{(n+h) \times p}$. این ماتریس‌ها می‌بایست به گونه‌ای طراحی شوند که خطای تخمین $e(t) = \xi(t) - \bar{\xi}(t)$ به صورت مجانبی به سمت صفر میل کند. برای این منظور یک خطای کمکی به صورت زیر تعریف می‌شود تا با استفاده از آن بتوان پایداری خطای تخمین را تضمین کرد

$$\varepsilon(t) = z(t) - DE \xi(t) \quad (۱۲)$$

با مشتق‌گیری از (۱۲) دینامیک خطای کمکی محاسبه شده و با اضافه و کم کردن عبارت $N \cdot DE \xi(t)$ رابطه زیر به دست می‌آید

$$\dot{\varepsilon}(t) = N \cdot \varepsilon(t) + [L \cdot \bar{C} + N \cdot DE - D \bar{A}] \xi(t) \quad (۱۳)$$

حال اگر ماتریس D به نحوی وجود داشته باشد که

$$L \cdot \bar{C} + N \cdot DE - D \bar{A} = 0 \quad (۱۴)$$

معادله (۱۳) به فرم زیر به دست می‌آید

$$\dot{\varepsilon}(t) = N \cdot \varepsilon(t) \quad (۱۵)$$

با اضافه و کم کردن $JDE \xi(t)$ به طرف راست معادله خروجی رُویتگر (۱۱) و استفاده از معادله خروجی سیستم (۱۰) داریم

$$\begin{aligned} \bar{\xi}(t) &= Jz(t) + Hy(t) + JDE \xi(t) - JDE \xi(t) \\ &= J\varepsilon(t) + [JDE + HC] \xi(t) \end{aligned} \quad (۱۶)$$

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \begin{bmatrix} \dot{} & I_n & \dot{} \\ -[Mub]^{-1} Kdynamic(\Omega) & -[Mub]^{-1} Cub(\Omega) & [Mub]^{-1} \end{bmatrix} \\ G &= [Mub]^{-1} \\ C &= [-[Mub]^{-1} Kdynamic(\Omega) \quad -[Mub]^{-1} Cub(\Omega)] \\ \bar{C} &= [-[Mub]^{-1} Kdynamic(\Omega) \quad -[Mub]^{-1} Cub(\Omega) [Mub]^{-1}] \end{aligned} \quad (۸)$$

با توجه به سنسورهای در دسترس، خروجی نیز به فرم زیر تعیین می‌شود

$$y(t) = [-[Mub]^{-1} Kdynamic(\Omega) \quad -[Mub]^{-1} Cub(\Omega)]x + [Mub]^{-1} U(\Omega, t) \quad (۶)$$

سپس با تبدیل دینامیک سیستم چرخ عکس‌عملی به یک سیستم سینگولار، تمام نیروها و گشتاورهای اغتشاشی در قالب بردار ورودی نامعین قرار می‌گیرند که در ادامه با طراحی رُویتگر و تخمین بردار ورودی نامعین در حقیقت نیروها و گشتاورهای اغتشاشی تخمین زده می‌شوند. در این صورت با تعریف بردار حالت به صورت

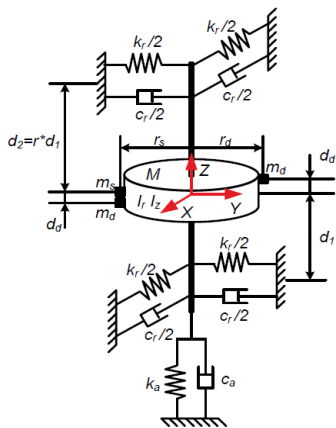
$$\xi(t) = \begin{bmatrix} x \\ U(\Omega, t) \end{bmatrix} \quad (۷)$$

ماتریس‌های معادلات فضای حالت و خروجی چرخ عکس‌عملی به فرم (۸) به دست می‌آیند. بنابراین شکل جدیدی برای مدل سیستم چرخ عکس‌عملی ارائه می‌شود تا با استفاده از این ساختار جدید، ماتریس‌های رُویتگر بر اساس یک سری نامساوی پایداری محاسبه شوند.

باید توجه داشت که به هنگام تشکیل بردار خروجی می‌بایست شرایط لازم طراحی رُویتگر بررسی شود. یکی از شرایط، این است که تعداد خروجی‌ها از تعداد ورودی‌های نامعین کمتر نباشد. بدیهی است که به منظور تخمین مناسب باید اطلاعات کافی از رفتار پاسخ سیستم در اختیار داشته باشیم و در صورتی که این شرط برقرار نباشد، ماتریس‌های طراحی به دست نمی‌آیند. از طرف دیگر، فقط اطلاعاتی از خروجی قابل استفاده است که شرایط طراحی رُویتگر را داشته باشند. در واقع با قراردادن سنسورهای نیرو و شتاب، فقط قسمتی از اطلاعات نمونه‌برداری شده از خروجی، قابل استفاده خواهند بود که شرایط لازم طراحی رُویتگر را برآورده کنند. بدین منظور بردار خروجی به صورتی که در بالا آورده شده است می‌بایست تشکیل شود.

۳- رُویتگر ورودی نامعین

همان طور که می‌دانیم، رُویتگر یک سیستم دینامیکی است که با استفاده از اطلاعات قابل دسترس ورودی و خروجی سیستم، حالت‌های غیر قابل اندازه‌گیری آن را تخمین می‌زند. در عمل بنا به دلایلی از قبیل عیب در سیستم و سنسورها، اغتشاش و نویز، ورودی‌های نامعینی به سیستم اضافه شده [۲۱] تا [۲۳] و سپس با استفاده از روش‌های کنترلی هوشمند و کلاسیک، رُویتگرهای متعددی طراحی گردیده است [۲۴] و [۲۵]. رُویتگر ورودی نامعین، دسته‌ای از رُویتگرها می‌باشد که به منظور حل مشکل تخمین این نوع از ورودی‌ها (که در عملگر چرخ عکس‌عملی نیز وجود دارند و به عنوان نیرو و گشتاورهای اغتشاشی شناخته می‌شوند) طراحی و به کار گرفته می‌شوند. در رُویتگر ورودی نامعین، حالت‌های سیستم و ورودی‌های نامعین، بردار الحاقی جدیدی را تشکیل می‌دهند و با تبدیل سیستم خطی به یک سیستم سینگولار، شرایط و محدودیت‌های طراحی برای یک سیستم سینگولار مورد بررسی قرار گرفته می‌شود. در ادامه از یک تابع لیاپانوف به منظور تحلیل پایداری دینامیک خطای کمکی استفاده می‌شود. مراحل طراحی رُویتگر و بررسی شرایط لازم



شکل ۲: مدل آنبالانسی چرخ عکس‌العملی [۲].

$$\begin{aligned} N &= D\bar{A}v_1 + Y\lambda_1, \quad L = D\bar{A}v_r + Y\lambda_r \\ H &= v_r + Y_r\lambda_r, \quad J = v_1 + Y_1\lambda_1 \end{aligned} \quad (25)$$

جهت به دست آوردن ماتریس Y ، با جایگذاری ماتریس N به دست آمده در روابط بالا در نامساوی ماتریسی خطی (۱۹)، نامساوی ماتریسی زیر به دست می‌آید

$$\Gamma = PD\bar{A}v_1 + v_1^T \bar{A}^T D^T P + PY\lambda_1 + \lambda_1^T Y^T P \quad (26)$$

نامساوی ماتریسی بالا به علت ظهور ترم‌های شامل ضرب ماتریس‌های مجهول PY ، غیر خطی می‌باشد و جهت تبدیل آن به نامساوی ماتریسی خطی باید تغییر متغیر $\bar{Y} = PY$ لحاظ شود. سپس با در نظر گرفتن اساس پایداری لیاپانوف مینی بر این که: "وجود دارد ماتریس‌های Y و P مثبت معین و متقارنی که اگر نامساوی فوق برقرار باشد آن گاه خطای تخمین تولیدشده توسط رویتگر به صورت مجانبی پایدار خواهد بود." با حل این نامساوی LMI در Limset Toolbox متلب مقادیر ماتریسی مناسب برای Y به دست می‌آید و نهایتاً با در دست داشتن تمامی مجهولات از محاسبات فوق و با در نظر گرفتن ماتریس دلخواه $Y_r \in R^{(n+h) \times (n+h)}$ ، مقادیر ماتریس‌های رویتگر (L, N, J, H) محاسبه می‌شوند.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده برای تخمین ورودی نامعین و حالات چرخ عکس‌العملی بر اساس مشخصات چرخ عکس‌العملی اشاره‌شده، ارائه می‌گردد. در این راستا با استفاده از دو مثال متفاوت، درستی عملکرد رویتگر جدید مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین ترتیب با ارائه دو نمونه ورودی نامعین، یکی به صورت عددی و دیگری به صورت یک تابع پیوسته، مراحل شبیه‌سازی بیان شده و نتایج آن با استفاده از نرم‌افزار Matlab در قالب نمودارهای ردیابی به شرح زیر ارائه می‌گردد. در مدل آنبالانس استاتیکی و دینامیکی چرخ عکس‌العملی (شکل ۲) که به ترتیب توسط جرم‌های m_s و m_d مشخص می‌شوند، جرم خود چرخ (M) در ماتریس Mub به شکل زیر ظاهر می‌شود

$$\begin{aligned} M_t &= M + m_s + 2m_d \\ Mub &= \begin{bmatrix} M_t & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & M_t & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & M_t & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & I_r & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & I_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

اگر ماتریس D به نحوی وجود داشته باشد که $JDE + H\bar{C} = I$ ، در این صورت با توجه به (۱۵) و (۱۶) داریم

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= N\varepsilon(t) \\ e(t) &= J\varepsilon(t) \end{aligned} \quad (17)$$

حال اگر شرایط مطرح‌شده در (۱۴) و $JDE + H\bar{C} = I$ به صورت ماتریسی در کنار هم قرار داده شوند، خواهیم داشت

$$\begin{bmatrix} N & L \\ J & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D\bar{A} \\ I \end{bmatrix} \quad (18)$$

با توجه به (۱۷) بدیهی است که اگر $\varepsilon(t)$ به صورت مجانبی به سمت صفر میل کند، آن گاه $e(t)$ نیز به صورت مجانبی به سمت صفر میل خواهد کرد. با استفاده از قضیه پایداری لیاپانوف، نامساوی ماتریسی خطی زیر را خواهیم داشت

$$N^T P + P N < \cdot \quad (19)$$

از آنجایی که ماتریس‌های رویتگر می‌بایست در (۱۸) صدق کنند. این معادله زمانی جواب دارد که شرط زیر برقرار باشد [۲۶]

$$\text{rank} \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \\ D\bar{A} \\ I \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix} = n + h \quad (1-20)$$

حال اگر ماتریس R یک ماتریس دلخواه با رتبه سطری کامل باشد که

$$\text{rank} \begin{bmatrix} R \\ \bar{C} \end{bmatrix} \text{rank} \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix} = n + h \quad (2-20)$$

در این صورت طبق [۲۶] ماتریس D به صورت زیر به دست می‌آید

$$D = R \begin{bmatrix} E \\ \bar{C} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} I \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (21)$$

آن گاه جواب عمومی (۱۸) به صورت زیر خواهد بود

$$\begin{bmatrix} N & L \\ J & H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D\bar{A} \\ I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix}^+ + \begin{bmatrix} Y \\ Y_r \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix}^+ \right) \quad (22)$$

که در آن $Y_r \in R^{(n+h-p) \times (n+h)}$ و $Y \in R^{(n+h) \times (n+h)}$ ماتریس‌های حقیقی دلخواه هستند. حال برای به دست آوردن روابط مربوط به ماتریس‌های رویتگر از معادله فوق، ماتریس‌های زیر تعریف می‌شوند

$$v_1 \triangleq \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} I_{(n+h-p) \times (n+h-p)} \\ \cdot_{p \times (n+h-p)} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$v_r \triangleq \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \cdot_{(n+h-p) \times p} \\ I_{p \times p} \end{bmatrix}$$

$$\lambda_1 \triangleq (I_{(n+h) \times (n+h)} - \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix}^+) \begin{bmatrix} I_{(n+h-p) \times (n+h-p)} \\ \cdot_{p \times (n+h-p)} \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\lambda_r \triangleq (I_{(n+h) \times (n+h)} - \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} DE \\ \bar{C} \end{bmatrix}^+) \begin{bmatrix} \cdot_{(n+h-p) \times p} \\ I_{p \times p} \end{bmatrix}$$

بدین ترتیب، ماتریس‌های طراحی رویتگر با استفاده از معادلات ماتریسی (۲۱) و روابط فوق، به شکل زیر به دست می‌آیند

$$[Cub(\Omega, t)] = \begin{bmatrix} c_r & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{-(c_r d_1 (r-1))}{2} \\ \cdot & c_r & \cdot & \frac{-(c_r d_1 (r-1))}{2} & \cdot \\ \cdot & \cdot & c_a & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{-(c_r d_1 (r-1))}{2} & \cdot & G & -I_z \omega \\ \frac{-(c_r d_1 (r-1))}{2} & \cdot & \cdot & I_z \omega & H \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{(c_r (r^x + 1) d_1^x)^r}{2} - I \omega \sin(2\omega t) \quad (27)$$

$$H = \frac{(c_r (r^x + 1) d_1^x)^r}{2} - I \omega \sin(2\omega t)$$

$$[Kdynamic(\Omega, t)] = \begin{bmatrix} k_x & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{-(d_1 k_x (r-1))}{2} \\ \cdot & k_y & \cdot & \frac{-(d_1 k_y (r-1))}{2} & \cdot \\ \cdot & \cdot & k_a & \cdot & \cdot \\ \cdot & \frac{-(d_1 k_y (r-1))}{2} & \cdot & \frac{d_1^x k_y (r^x + 1)}{2} & \cdot \\ \frac{-(d_1 k_x (r-1))}{2} & \cdot & \cdot & \cdot & \frac{d_1^x k_x (r^x + 1)}{2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

می‌شود. برای این کار یک ماتریس اختیاری با رتبه کامل (R) انتخاب شده و مقدار D به دست می‌آید.

(۳) با جایگذاری ماتریس D در (۲۳) و (۲۴)، مقادیر v_1, v_2, v_3 و λ_1 جهت حل (۲۱) حاصل می‌شوند.

(۴) با حل نامساوی ماتریسی (۲۶) توسط جعبه ابزار کنترل مقاوم نرم‌افزار Matlab، مقادیر ماتریس‌های \hat{Y}, Y_r و P با دست داشتن ماتریس‌های محاسبه‌شده در ۲ مرحله قبلی به دست می‌آیند.

(۵) در آخر با تغییر متغیر $Y = P^{-1} \hat{Y}$ و با استفاده از (۲۵)، ماتریس‌های رؤیتگر برای هر لحظه از زمان محاسبه می‌شوند.

نتایج شبیه‌سازی‌های به دست آمده در دو قسمت، یکی تخمین ورودی نامعین و دیگری تخمین حالات سیستم متأثر از ورودی نامعین به ترتیب در شکل‌های ۳ تا ۷ ارائه می‌شوند.

با توجه به نتایج فوق، همان‌طور که مشاهده می‌شود ورودی‌های نامعین از جنس نیرو و گشتاور در زوایا و جهت‌های مختلف که ناشی از آنالانسی استاتیکی و دینامیکی چرخ عکس‌عملی هستند، توسط رؤیتگر پیشنهادی به طور کاملاً مطلوب ردیابی شده‌اند. بدین طریق با استخراج اطلاعات از رؤیتگر، شناسایی سیستم و تحلیل مشخصه‌ها به راحتی قابل انجام خواهد بود. علاوه بر این، نتایج حاصل از تأثیر ورودی اغتشاش بر حالات سیستم نیز به ترتیب زیر در شکل‌های ۸ الی ۱۲ تخمین زده شده‌اند.

نتایج حاصل از این شکل‌ها در واقع نشان‌دهنده ردیابی حالات سیستم با ورودی نامعین می‌باشد که رؤیتگر جدید به خوبی توانسته که تخمین در فرکانس‌های مختلف را انجام دهد. زمان نشست تخمین به طور تقریبی برابر با ۲ ثانیه است که زمان قابل قبولی می‌باشد.

۴-۲ ورودی نامعین، مثال دوم

در این قسمت، مثال دیگری برای سیستم طراحی‌شده در بخش سوم

که M_r و I_r به ترتیب ممان اینرسی برآیند شعاعی و وزن چرخ می‌باشند. در این راستا (۲۷) و (۲۸) ماتریس‌های مورد نیاز برای تشکیل مدل میکرواغتشاش چرخ عکس‌عملی خواهند بود [۱۸]. حال با توجه به محاسبات انجام‌گرفته (محاسبه ماتریس جرم، دمینگ و سختی فنر سیستم) بر اساس فرمول‌های ارائه‌شده در بخش‌های قبلی، می‌توان به راحتی مدل میکرواغتشاش سیستم چرخ را به شکل زیر برقرار کرد

$$[Mub]a + [Cub(\Omega, t)]v + [Kdynamic(\Omega, t)]u = [U(\Omega, t)] \quad (29)$$

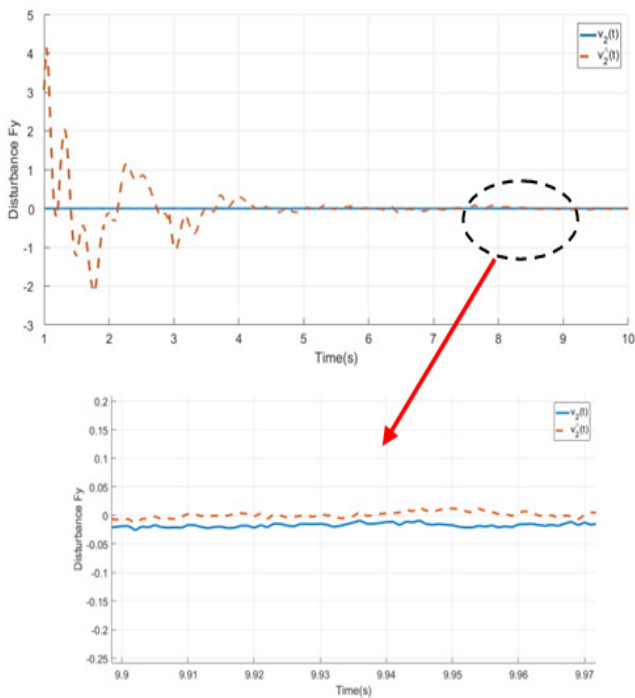
اگر سیستم خطی چرخ عکس‌عملی به فرم (۹) در نظر گرفته شود، آن‌گاه برای فضای ابعادی سیستم چرخ موجود، $x \in R^{10}$ حالت‌های سیستم، $v \in R^5$ ورودی‌های نامعین و $y \in R^5$ خروجی سیستم می‌باشند. بدین ترتیب ماتریس‌های مشخصه فضای حالت سیستم فوق با توجه به (۵) و (۶) محاسبه می‌شوند. با توجه به اطلاعات بخش دوم و محاسبات فوق، دینامیک متغیر با زمان سیستم چرخ عکس‌عملی موجود به دست می‌آید. در این قسمت، روند طراحی ذکرشده در بخش سوم به همراه نتایج شبیه‌سازی برای مثال اول گام به گام توضیح داده شده و برای مثال دوم فقط نتایج نهایی ارائه می‌شود.

۴-۱ ورودی نامعین، مثال اول

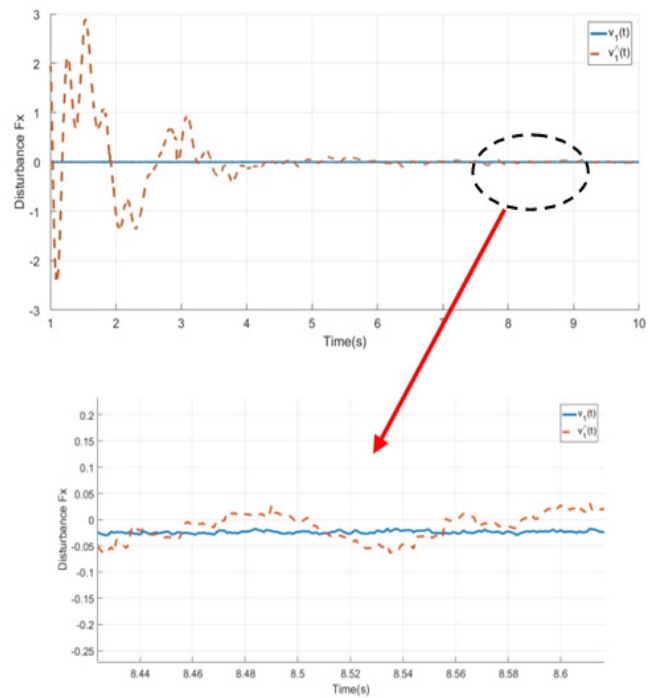
روند طراحی رؤیتگر پیشنهادی برای سیستم محاسبه‌شده فوق با مقادیر اولیه حالت‌های دلخواه و بردار ورودی نامعین متناسب با داده‌های واقعی به شرح زیر خواهد بود:

(۱) ورودی اغتشاش شامل ۳ نوع داده از جنس نیرو در ۳ راستای x, y و z و ۲ نوع داده از جنس گشتاور در جهت‌های θ و ϕ می‌باشند که با دامنه‌های بسیار کوچک در شکل‌های بعدی نشان داده می‌شوند.

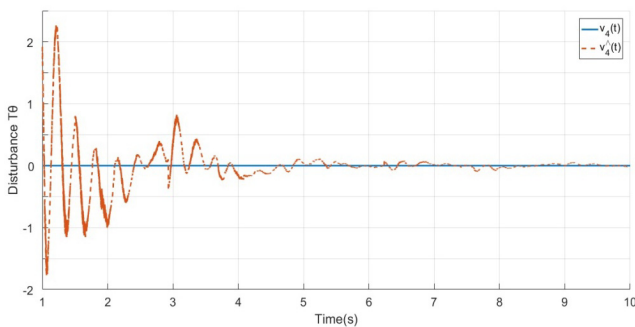
(۲) با استفاده از (۲۱) برای هر لحظه از زمان، مقدار D محاسبه



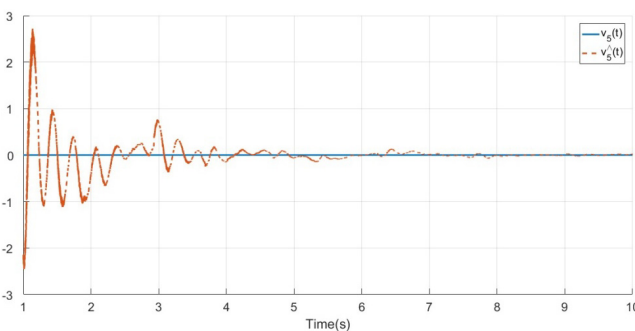
شکل ۴: نمودار داده واقعی اغتشاش از جنس نیرو در راستای محور Y (نمودار آبی‌رنگ) و نمودار تخمین اغتشاش (نمودار قرمز رنگ).



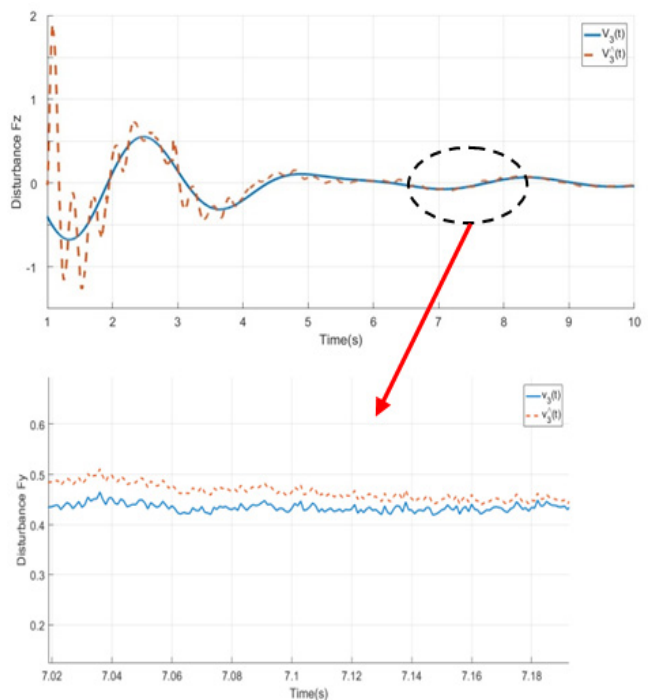
شکل ۳: نمودار داده واقعی اغتشاش از جنس نیرو در راستای محور X (نمودار آبی‌رنگ) و نمودار تخمین اغتشاش (نمودار قرمز رنگ).



شکل ۶: نمودار داده واقعی اغتشاش از جنس گشتاور در جهت زاویه θ (نمودار آبی‌رنگ) که مقدار رو به صفری دارد و نمودار تخمین اغتشاش (نمودار قرمز رنگ).



شکل ۷: نمودار داده واقعی اغتشاش از جنس گشتاور در جهت زاویه ϕ (نمودار آبی‌رنگ) که مقدار رو به صفری دارد و نمودار تخمین اغتشاش (نمودار قرمز رنگ).



شکل ۵: نمودار داده واقعی اغتشاش از جنس نیرو در راستای محور Z (نمودار آبی‌رنگ) و نمودار تخمین اغتشاش (نمودار قرمز رنگ).

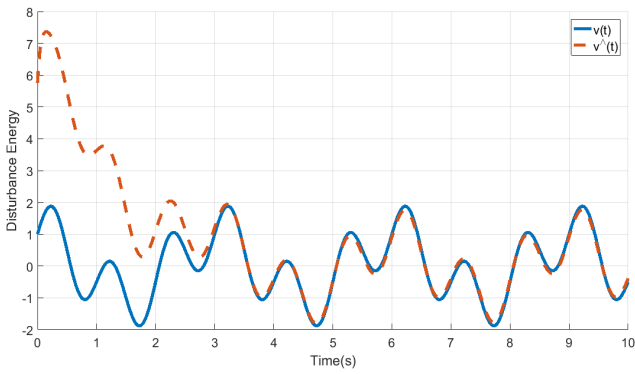
با مقادیر اولیه حالت‌های دلخواه در نظر گرفته شده است. در این مثال بردار ورودی نامعینی به شکل زیر اعمال می‌شود

$$U(\Omega, t) = \sin(2\pi t) + \cos\left(\frac{2\pi t}{3}\right) \quad (30)$$

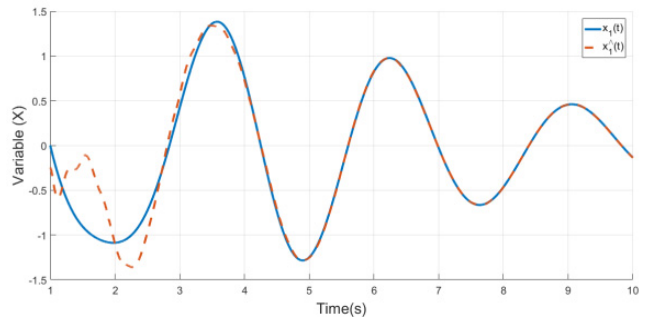
هدف این است که با استفاده از یک مثال دیگر، مراحل تخمین ورودی اغتشاش نامعین و حالت‌های سیستم اجرا شود تا درستی عملکرد طراحی روتینگر جدید بار دیگر ارزیابی گردد. در این راستا با توجه به شکل ۱۳ ورودی اغتشاش فرضی به خوبی توسط روتینگر پیشنهادی ردیابی شده است.

نتایج به نمایش درآمده در شکل‌های ۱۳ تا ۱۸ نیز نشان‌دهنده ردیابی حالات سیستم ناشی از ورودی نامعین فرضی هستند که توسط روتینگر پیشنهادی به خوبی ردیابی شده‌اند. همان طور که مشاهده می‌شود، روتینگر پیشنهادی در مدت زمان مناسب توانسته است که عملیات تخمین را به خوبی انجام دهد. همچنین با توجه به قضیه پایداری که نتایج آن در نامساوی (۲۶) بیان شده است، پایدار بودن سیستم به مقدار Y_r وابسته نمی‌باشد. لذا این ماتریس می‌تواند به صورت اختیاری انتخاب شود و در نتیجه می‌توان دسته‌ای از روتینگرها با عملکردهای متفاوت را نیز برای

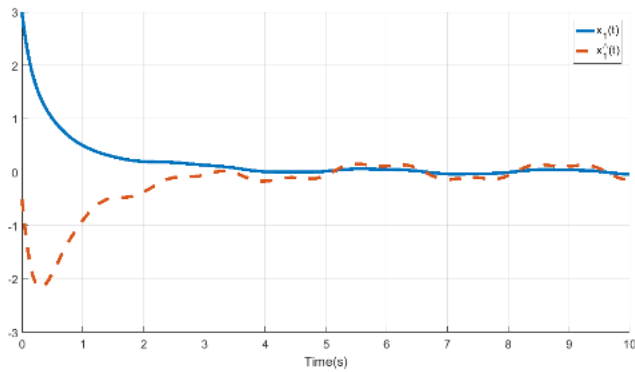
سیستم مورد نظر (۱۰) طراحی کرد.



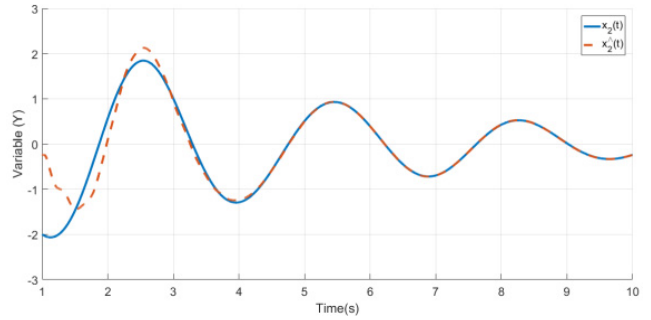
شکل ۱۳: نمودار اغتشاش فرضی (نمودار آبی‌رنگ) و نمودار تخمین اغتشاش (نمودار قرمز رنگ).



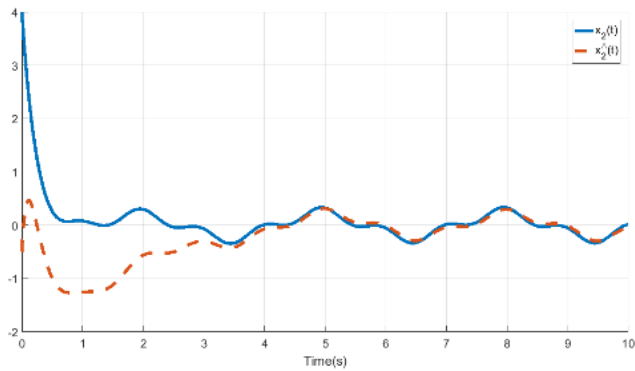
شکل ۸: نمودار متغیر حالت X (خط آبی‌رنگ) و تخمین آن (خط قرمز رنگ).



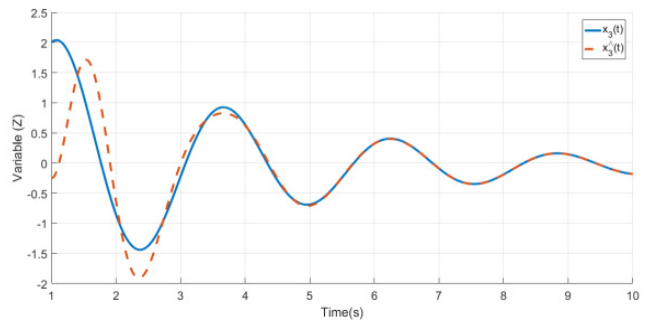
شکل ۱۴: نمودار متغیر حالت X (خط آبی‌رنگ) و تخمین آن (خط قرمز رنگ).



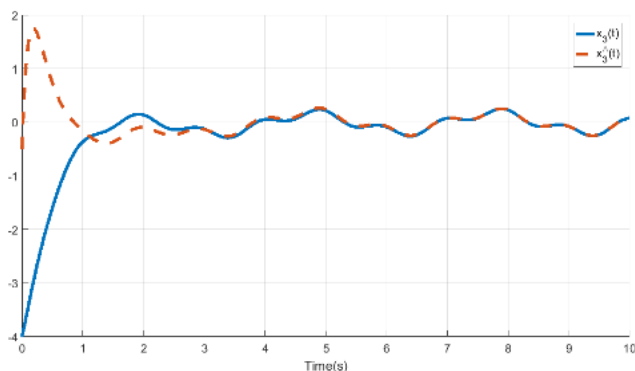
شکل ۹: نمودار متغیر حالت Y (خط آبی‌رنگ) و تخمین آن (خط قرمز رنگ).



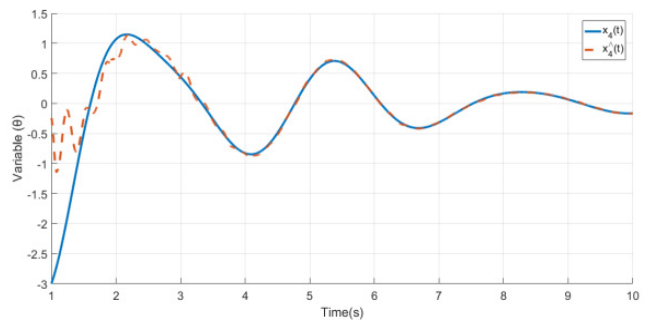
شکل ۱۵: نمودار متغیر حالت Y (خط آبی‌رنگ) و تخمین آن (خط قرمز رنگ).



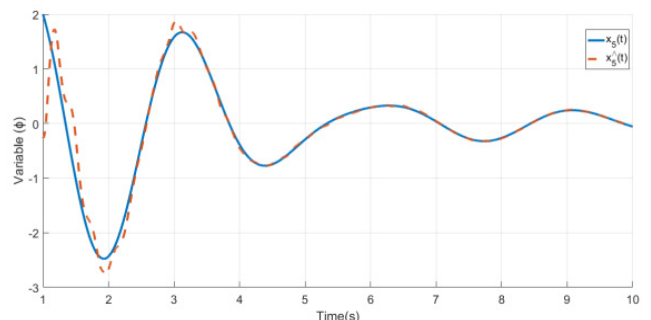
شکل ۱۰: نمودار متغیر حالت Z (خط آبی‌رنگ) و تخمین آن (خط قرمز رنگ).



شکل ۱۶: نمودار متغیر حالت Z (خط آبی‌رنگ) و تخمین آن (خط قرمز رنگ).



شکل ۱۱: نمودار متغیر حالت θ (خط آبی‌رنگ) و تخمین آن (خط قرمز رنگ).



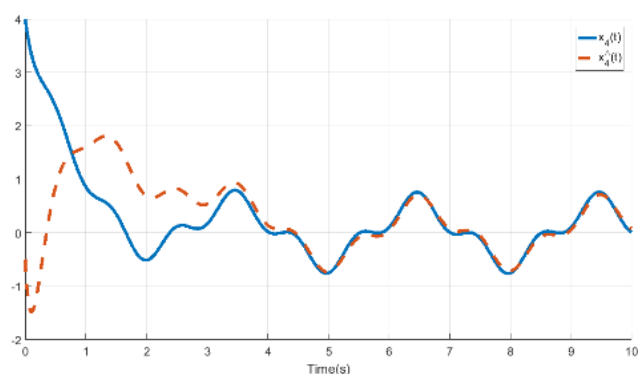
شکل ۱۲: نمودار متغیر حالت ϕ (خط آبی‌رنگ) و تخمین آن (خط قرمز رنگ).

۵- نتیجه‌گیری

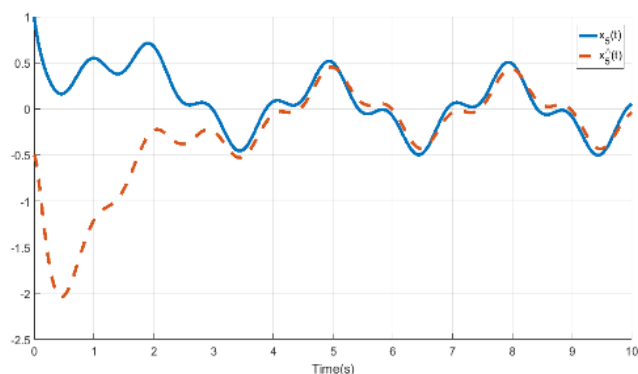
در این مقاله ابتدا مدل میکرواغتشاش چرخ عکس‌العملی توصیف شده و سپس ورودی‌های نامعین اغتشاش (برگرفته از داده‌های واقعی) به

- [8] O. D. Montoya and W. Gil-Gonzalez, "Nonlinear analysis and control of a reaction wheel pendulum: Lyapunov-based approach," *J. of Engineering Science and Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 21-29, Feb. 2020.
- [9] P. Zhang, Z. Wu, H. Dong, M. Tan, and J. Yu, "Reaction-wheel-based roll stabilization for a robotic fish using neural network sliding mode control," *J. of IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 25, no. 4, pp. 1904-1911, Aug. 2020.
- [10] H. Alkomy and J. Shan, "Modeling and validation of reaction wheel micro-vibrations considering imbalances and bearing disturbances," *J. of Sound and Vibration*, vol. 492, Article ID: 115766, 3 Feb. 2021.
- [11] K. Ataalp and M. Gurtan, "System level analysis of reaction wheel micro-vibrations," in *Proc. IEEE 9th Int. Conf. on Recent Advances in Space Technologies*, pp. 301-306, Istanbul, Turkey, 11-14 Jun. 2019.
- [12] J. Alcorn, C. Allard, and H. Schaub, "Fully coupled reaction wheel static and dynamic imbalance for spacecraft jitter modeling," *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 41, no. 6, pp. 1380-1388, Jun. 2018.
- [13] J. Kampmeier, R. Larsen, L. F. Migliorini, and K. A. Larson, "Reaction wheel performance characterization using the kepler spacecraft as a case study," in *Proc. SpaceOps Conf.*, 18 pp., Marseille, France, 28 May-1 Jun. 2018.
- [14] G. Belascuen and N. Aguilar, "Design, modeling and control of a reaction wheel balanced inverted pendulum," in *Proc. IEEE Biennial Congress of Argentina*, 9 pp., an Miguel de Tucuman, Argentina, 6-8 Jun. 2018.
- [15] J. T. King, "Increasing agility in orthogonal reaction wheel attitude control systems," *Acta Astronautica*, vol. 177, pp. 673-683, Dec. 2020.
- [16] G. P. Neves, B. A. Angelico, and C. M. Agulhari, "Robust \mathcal{H}_2 controller with parametric uncertainties applied to a reaction wheel unicycle," *International J. of Control*, vol. 93, no. 10, pp. 2431-2441, 2020.
- [17] R. A. Masterson, D. W. Miller, and R. L. Grogan, "Development and validation of reaction wheel disturbance models: empirical model," *J. of Sound and Vibration*, vol. 249, no. 3, pp. 575-598, Jan. 2002.
- [18] Z. Zhang, G. S. Aglietti, and W. J. Ren, "Microvibration model development and validation of a cantilevered reaction wheel assembly," *J. of Vibration, Structural Engineering and Measurement II, Applied Mechanics and Materials, Trans. Tech Publications*, vol. 226, pp. 133-137, Nov. 2012.
- [19] M. P. Le, *Micro-Disturbances in Reaction Wheels*, Ph.D. Dissertation. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2017.
- [20] D. K. Kim, "Micro-vibration model and parameter estimation method of a reaction wheel assembly," *J. of Sound and Vibration*, vol. 333, no. 18, pp. 4214-4231, 1 Sept. 2014.
- [21] H. Septanto, F. Kurniawan, B. Setiadi, E. Kurniawan, and D. Suprijanto, "Disturbance observer-based attitude control of the air-bearing platform using a reaction wheel," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology*, pp. 1-6, Nov. 2021.
- [22] Y. Hu, Z. Lu, W. Liao, and X. Zhang, "Attitude control of the low earth orbit satellite with moving masses under strong aerodynamic disturbance," in *Proc. IEEE 7th Int. Conf. on Mechanical Engineering and Automation Science*, pp. 32-38, Seoul, South Korea, 28-30 Oct. 2021.
- [23] X. Hou, J. Zhang, Y. Ji, W. Liu, and C. He, "Autonomous drift controller for distributed drive electric vehicle with input coupling and uncertain disturbance," *J. of ISA Trans.*, vol. 120, pp. 1-17, Jan. 2021.
- [24] Y. Si and M. A. Ayoubi, "Attitude tracking control of spacecraft with reaction wheel disturbances via takagi-sugeno fuzzy model," *AIAA SCITECH Forum*, pp. 1418-1419, San Diego, CA, USA & Virtual, 3-7 Jan. 2022.
- [25] C. Aguiar, D. Leite, D. Pereira, G. Andonovski, and I. Skrjanc, "Nonlinear modeling and robust LMI fuzzy control of overhead crane systems," *J. of the Franklin Institute*, vol. 358, no. 2, pp. 1376-1402, Jan. 2021.
- [26] M. Darouach, L. Boutat-Baddas, and M. Zerrougui, " H_∞ observers design for a class of nonlinear singular systems," *Automatica*, vol. 47, no. 11, pp. 2517-2525, Nov. 2011.

آرمان صحت نیا تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق کنترل در سالهای ۱۳۸۴ الی ۱۳۸۹ و کارشناسی ارشد مهندسی مکترونیک در سالهای ۱۳۹۰ الی ۱۳۹۲ در دانشگاه تبریز به پایان رسانده است و هم‌اکنون به عنوان دانشجوی دکتری مهندسی برق کنترل دانشگاه تبریز مشغول می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند سیستم‌های سوئیچینگ و کنترل مقاوم می‌باشد.



شکل ۱۷: نمودار متغیر حالت θ (خط آبی‌رنگ) و تخمین آن (خط چین قرمز رنگ).



شکل ۱۸: نمودار متغیر حالت ϕ (خط آبی‌رنگ) و تخمین آن (خط چین قرمز رنگ).

دینامیک متغیر با زمان چرخ، در حالت آنبالانسی استاتیکی و دینامیکی، اعمال گردیده است. در ادامه، جهت شناسایی ورودی‌های نامعین که به صورت اغتشاش وارد شده به سیستم در نظر گرفته می‌شوند و بررسی تأثیر آنها بر پارامترهای اصلی سیستم، از یک روتینگر جدید با فرم کاهش مرتبه یافته، استفاده گردیده که با استناد بر قضایای اثبات شده، ماتریس‌های طراحی روتینگر پیشنهادی در هر لحظه از زمان با انجام یک سری محاسبات نامساوی‌های ماتریسی (LMI) به دست می‌آیند که همگرایی و پایداری خطای تخمین این روش بر اساس قضیه لیاپانوف اثبات شده است.

مراجع

- [1] H. S. Oh and D. I. Cheon, "Precision measurements of reaction wheel disturbances with frequency compensation process," *J. of Mechanical Science and Technology*, vol. 19, no. 1, p.136, J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, 3rd Ed., vol. 2, Oxford: Clarendon, 1892, pp. 68-73, Jun. 2005.
- [2] ع. آقلازی و م. ایرانزاد، "مدل سازی کامل اغتشاشات چرخ عکس‌العملی و پیاده سازی روی یک نمونه آزمایشگاهی،" *فصلنامه علوم و فناوری فضایی*، دوره ۶ شماره ۱، صص. ۹۱-۷۷، بهار ۱۳۹۲.
- [3] B. J. Margolies, *Systematic Evaluation and Analysis System for Yield Control in Large Cheese Factories*, MS Thesis, 2017.
- [4] A. Baimyshev, A. Zhakatayev, and H. A. Varol, "Augmenting variable stiffness actuation using reaction wheels," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 4618-4628, 2016.
- [5] K. C. Liu, P. Maghami, and C. Blaurock, "Reaction wheel disturbance modeling, jitter analysis, and validation tests for solar dynamics observatory," in *Proc. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf. and Exhibit*, 18 pp., Honolulu, HI, USA, Aug. 2008.
- [6] B. Xiao, Q. Hu, W. Singhose, and X. Huo, "Reaction wheel fault compensation and disturbance rejection for spacecraft attitude tracking," *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 36, no. 6, pp. 1565-1575, Nov. 2013.
- [7] H. Yadegari, H. Chao, and Z. Yukai, "Finite time sliding mode controller for a rigid satellite in presence of actuator failure," in *Proc. IEEE 3rd Int. Conf. on Information Science and Control Engineering*, pp. 1327-1331, Beijing, China, 8-10 Jul. 2016.

حمید قوچی اسکندر تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مکانیک سیالات در سال‌های ۱۳۸۴ الی ۱۳۸۸ و مقطع کارشناسی ارشد مکانیک طراحی کاربردی در سال‌های ۱۳۹۱ الی ۱۳۹۳ در دانشگاه آزاد تبریز به پایان رسانده است.

فرزاد هاشم‌زاده در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی مهندسی پزشکی خود را از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و در سال ۱۳۸۵ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق کنترل خود را از دانشگاه تهران و در سال ۱۳۹۱ مدرک دکتری تخصصی خود را در زمینه مهندسی برق کنترل از دانشگاه تبریز اخذ نموده است. دکتر هاشم‌زاده از سال ۱۳۹۱ به عنوان عضو هیأت علمی در دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز مشغول به کار هستند و هم‌اکنون دارای درجه دانشیاری می‌باشند. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند تل‌راتیک، کنترل شبکه و سیستم‌های تاخیردار می‌باشد.