



## کاهش نویز فعال در یک چرخ عکس‌العملی با استفاده همزمان از شناسایی سیستم دینامیکی و موجک روی خط

حبیب‌الله خاکساری<sup>1</sup>، عبدالمجید خوشنود<sup>2\*</sup>، جعفر روشنی‌یان<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

2- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

3- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران

\* صندوق پستی 16569-83911، khoshnood@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 24 شهریور 1393

پذیرش: 13 دی 1393

ارائه در سایت: 11 بهمن 1393

کلید واژگان:

چرخ عکس‌العملی

موجک روی خط

پیش‌بینی اسمیت

شناسایی سیستم

### چکیده

چرخ‌های عکس‌العملی از جمله وسایل تبادل مومنتم زاویه ای هستند، که در پایدارسازی وضعیت ماهواره و مانورهای وضعیت آن مورد استفاده قرار می‌گیرند. کنترل وضعیت ماهواره از مسائل مهم است اما به دلیل نویز و اغتشاشات، سیگنال خروجی چرخ عکس‌العملی دچار نویز می‌شود که از جمله این اغتشاشات می‌توان به نابالاسی چرخ‌ها اشاره کرد. ابزارهای توانمند پردازش سیگنال از جمله موجک‌ها تاکنون در تحلیل خارج خط سیگنال‌های نویزی مشابه کاربرد بسیار زیادی داشته‌اند. اما اینکه بتوان این ابزارها را به طور روی خط در فرایند کنترل حلقه بسته وارد کرد تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مشکل عمده این موضوع به حجم بالای پردازش و تأخیر ایجاد شده برمی‌گردد. این نویز را می‌توان با طراحی یک بانک فیلتر موجک شناسایی و حذف نمود. اما به دلیل وجود تأخیر در بانک فیلتر که گریز ناپذیر است، سیستم دچار ناپایداری می‌شود. از این رو، در این مقاله با یک رویکرد پیش‌بینی از الگوریتم اسمیت استفاده شده است تا بتوان تأخیر ایجاد شده از فرایند حذف نویز را به خارج از حلقه کنترل انتقال داده و سیستم را پایدار و خروجی را تا حد زیادی به سیستم بدون نویز نزدیک کرد. دقت این الگوریتم نیازمند داشتن تخمینی از دینامیک سیستم و آگاهی از میزان تأخیر آن است. با توجه به استفاده از فیلترهای پاسخ ضربه محدود، تأخیر به طور کامل قابل محاسبه است. همچنین روش شناسایی حداقل مربعات بازگشتی برای شناسایی چرخ عکس‌العملی برای داشتن تخمینی دقیق از سیستم مورد استفاده قرار گرفته است.

## Active Noise Cancelation in a Reaction Wheel by simultaneous using of dynamical system identification and online wavelet

Habib Khaksari, Abdolmajid Khoshnood\*, Jafar Roshanian

Aerospace Engineering Department, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1656983911 Tehran, Iran, khoshnood@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 15 September 2014  
Accepted 03 January 2014  
Available Online 31 January 2015

**Keywords:**  
Reaction Wheel  
Online Wavelet  
Smith predictor  
System Identification

### ABSTRACT

Reaction wheels are angular momentum exchange devices used to stabilize the position of the satellite and maneuvering. This actuator can change the momentum of the satellite to alter the attitude of the system. During the process of operation, noise and disturbances resulting from the unbalancing of the wheels lead to inconvenient performance of the reaction wheels. Several works have been presented for active noise cancelation in these devices. But, the practical tools of signal processing such as filter banks and wavelets, which are used for offline de-noising, are samples of very useful noise cancellation methods. If these toolboxes are employed for online de-noising these signal processing approaches are applicable for noisy systems such as reaction wheels. The main challenge of this strategy is the delay resulting from the signal processing, which is inevitable. In this paper, a strategy of online wavelet de-noising is designed and proposed for noise cancellation in a reaction wheel. In this regards, for considering the delay compensation the method of Smith predictor is used to lead the delay of the process out of the closed loop control system. The accuracy of this algorithm requires an estimate of the system dynamics and an understanding of the delay system. Using FIR filter, the delay can be fully calculated. The recursive least squares is used for identification of reaction wheel as an estimate of the system.

### 1- مقدمه

ماهواره دارد، با ماهواره تعامل داشته و می‌تواند اندازه حرکت ماهواره را تغییر داده، آن را از اثر گشتاورهای مزاحم وارده مصون نگه دارد، یا ماهواره را به اندازه زاویه دلخواهی بچرخاند. چرخ عکس‌العملی شامل یک روتور دوار سنگین است که با کمک یک موتور الکتریکی به دوران درمی‌آید. در حالت

چرخ‌های عکس‌العملی از جمله وسایل تبادل مومنتم زاویه‌ای هستند، که در پایدارسازی وضعیت ماهواره و مانورهای وضعیت آن استفاده می‌شوند. در روش تبادل مومنتم عضو چرخان دیگری که آزادی حرکت دورانی نسبت به

Please cite this article using:

H. Khaksari, A. Khoshnood, J. Roshanian, Active Noise Cancelation in a Reaction Wheel by simultaneous using of dynamical system identification and online wavelet, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 146-152, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

از تئوری موجک استفاده شده تمام تلاش‌ها معطوف به دو موضوع است، یکی تا حد امکان کاهش تأخیر این روش و دیگری حل موضوع تأخیر از طریق سیستم کنترل‌کننده اصلی. در این پژوهش با استفاده از روش پیش‌بین اسمیت برای حل مسأله تأخیر به کار گرفته شده است. دقت این الگوریتم نیازمند داشتن تخمینی از دینامیک سیستم و آگاهی از میزان تأخیر موجود در سیستم است. با توجه به استفاده از فیلترهای پاسخ ضربه محدود، تأخیر به طور کامل قابل محاسبه است. اما تخمینی از دینامیک سیستم نیز مسأله مهمی است که باید به آن توجه شود. با توجه به اینکه این الگوریتم در مواردی به کار برده شده که دینامیک سیستم به صورت تقریبی نه دقیق به کار برده شده است [2] همچنین هر چه تخمین دینامیک سیستم به سیستم اصلی نزدیک‌تر باشد دقت این روش بیشتر خواهد بود؛ در غیر این صورت دقت روش اسمیت کاهش یافته و پاسخ سیستم حذف نویز شده نسبت به سیستم اصلی بدون نویز چرخ عکس‌العملی دچار خطا می‌شود. خطای ایجاد شده باعث ایجاد خطایی در کنترل وضعیت ماهواره شده و ایجاد خطا در سمت‌گیری ماهواره در مدار مربوطه می‌شود. با توجه به این نکته هدف اصلی این مقاله شناسایی هم‌زمان دینامیک چرخ عکس‌العملی برای داشتن تخمینی دقیق نه تقریبی از دینامیک سیستم و بانک فیلتر موجک است. از این رو، روش شناسایی سیستم حداقل مربعات بازگشتی که روشی آنلاین برای شناسایی سیستم است برای اولین بار در این پژوهش با روش پیش‌بین اسمیت به همراه بانک فیلتر موجک مورد استفاده قرار گرفته است. دقت این روش با توجه به مسأله شناسایی متفاوت است اما در اکثر کاربردهای مورد استفاده از این روش جواب‌های بدست آمده دقت بالایی دارند. در ادامه ابتدا به تئوری بانک فیلتر موجک پرداخته و سپس به دینامیک چرخ عکس‌العملی و منابع ایجاد نویز در چرخ‌های عکس‌العملی پرداخته خواهد شد. پس از بیان روش پیش‌بین اسمیت به همراه شناسایی سیستم به روش حداقل مربعات بازگشتی نتایج حاصل ارائه می‌شود.

## 2- تئوری موجک

تبدیل موجک سیگنال  $f(t)$ ، به عنوان ضرب داخلی این سیگنال با توابع موجک تعریف شده و با رابطه (1) مشخص می‌شود.

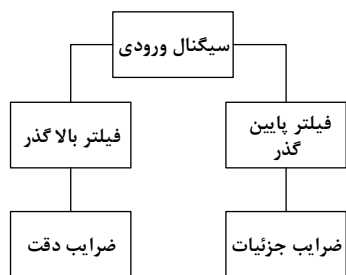
$$W_f(a, b) = \left\langle f(t), \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) \right\rangle \\ = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi \left( \frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (1)$$

که در آن  $\psi(t)$  تابع موجک مادر و  $a$  و  $b$  پارامترهای تبدیل هستند. تبدیل موجک را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که مقدار آن برابر میزان شباهت تابع  $f(t)$  در بردار پایه  $1/\sqrt{|a|} \cdot \psi(t-b/a)$  به دست می‌آید که مبین تصویر  $f(t)$  در راستای این بردار پایه است. واضح است که هر چه حاصل ضرب به دست آمده بزرگتر باشد نشان دهنده شباهت بیشتر این دو است. همچنین از مهم‌ترین ویژگی‌های تبدیل موجک امکان انتخاب موجک مادر از میان مجموعه بزرگی از توابع است. به علت پیوسته بودن پارامترهای  $a$  و  $b$  تبدیل موجک تابع  $f(t)$  دارای افزونگی است. برای حذف این افزونگی می‌توان پارامترهای زمان و مقیاس را گسسته کرد. یکی از روش‌های انجام این کار که به تجزیه دودویی معروف است به صورت رابطه (2) است [8]:

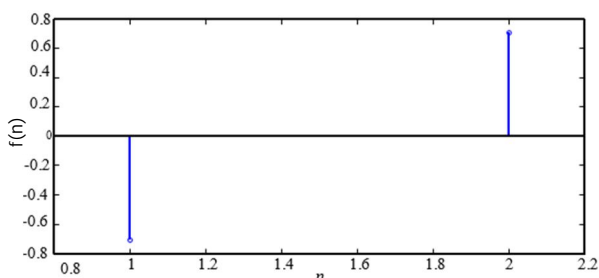
$$a = 2^{-j} \quad b = 2^{-k} \cdot l \quad \forall j, k \in Z \quad (2)$$

از رابطه (2) نتیجه می‌شود:

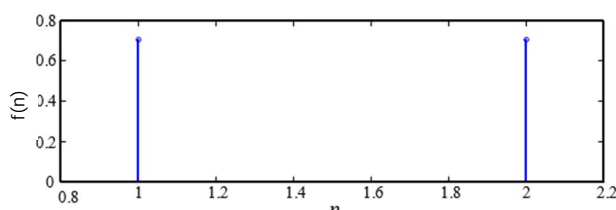
عادی، که ماهواره در حالت تعادل مطلوب قرار دارد، موتور خاموش بوده و چرخ متوقف می‌شود. در صورتی که نیاز باشد ماهواره در جهت خاصی دوران نماید، چرخ توسط موتور در خلاف آن جهت به حرکت درآمده و اندازه حرکت لازمه را به ماهواره می‌دهد. از این نظر اندرکنش چرخ و ماهواره بسیار شبیه درگیری دو چرخ‌دنده است. با توجه به هزینه‌های سنگینی که صرف ارسال ماهواره به فضا می‌شود کنترل وضعیت و سمت‌گیری ماهواره از مسائل مهم و مورد توجه طراحان ماهواره می‌باشد. نویز در خروجی چرخ عکس‌العملی باعث ایجاد خطا در سرعت زاویه‌ای تصحیح وضعیت ماهواره می‌شود. در راستای حذف نویز ایجاد شده در سیستم فوق‌فعالیت‌های محدودی صورت گرفته است. اغلب فعالیت‌ها در رابطه با حذف نویز خارج خط و در شرایط حلقه باز صورت پذیرفته است. منظور از موجک برخط یا آنلاین بدین معنا است که سیگنال دارای نویز پس از عبور از بانک فیلتر موجک و نویز زدایی آن در قسمتی دیگر از زیر سیستم‌های موجود در آن سیستم مورد استفاده قرار گیرد. برای نمونه بلوک حذف نویز در قسمت پس‌خور حلقه کنترل استفاده شده است. [1,2] این در حالی است که موجک خارج خط یا آفلاین پس از حذف نویز در قسمت‌های دیگر سیستم مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. موجک خارج خط برای علوم مختلف که احتیاج و یا امکان برخط بودن وجود ندارد، کاربرد فراوانی دارد؛ از جمله می‌توان به تحلیل خارج خط و حذف نویز پرتو گاما (پزشکی) [3]، نویز زدایی و پردازش سیگنال‌های صوتی [4] و نویز زدایی از تصاویر [5] اشاره کرد. همچنین در فعالیت‌هایی که از ابزارهای پردازش سیگنال استفاده شده است به دلیل محدودیت‌های ایجاد شده در حجم محاسبات و تأخیر ایجاد شده همه روش‌ها به جز موارد معدودی نظیر مقاله چپالایوس و همکاران [1,2] و همچنین مقاله کیبینگ و همکاران [6] - که آن را تنها فعالیت روی خط می‌توان دانست - سایر پژوهش‌ها خارج خط بوده است. در سال‌های اخیر به بحث تشخیص خطا در سیستم‌های مختلف به صورت برخط توجه زیادی شده است. از جمله این موارد می‌توان به مقاله مرجع [7] که تشخیص خطای آنلاین سنسور در یک راکتور هسته‌ای است اشاره کرد. برای عملکرد سیستمی نظیر چرخ عکس‌العملی فعالیت روی خط و عملکرد حذف نویز در مسیر حلقه بسته کنترل امری بسیار مهم و حیاتی است. در این مقاله با بهره‌گیری از ابزار توانمند موجک در پردازش سیگنال این موضوع محقق شده است. در این میان، برای حذف نویز سیگنال خروجی چرخ عکس‌العملی از بانک فیلتر موجک روی خط که مستقیماً در حلقه کنترل قرار می‌گیرد، استفاده شده است. بانک فیلترهای موجک یکی از ابزارهای پرکاربرد در شناسایی و حذف نویز است. دقت بازسازی سیگنال در بانک فیلتر موجک بسیار بالا است اما تنها مشکلی که در این نوع بانک فیلتر وجود دارد تأخیر بالا در خروجی آن است. به عبارت دیگر با استفاده از تئوری بانک فیلتر موجک، سیستم باید زمانی را صرف کند تا عملیات حذف نویز انجام شود به عنوان نمونه در تئوری موجک سیگنال دریافتی را ابتدا با استفاده از تبدیل موجک گسسته تا سطح مورد نیاز تجزیه و سپس با حذف ضرابی که نویز روی آن‌ها قرار دارد سیگنال را بازبایی می‌کند. این مراحل بسته به سرعت سیستم و پردازنده‌های آن و همچنین تعداد مراحل تجزیه خود مدتی طول می‌کشد. این تأخیر مشکل جدی را در مسیر حلقه بسته سیستم کنترل اصلی ایجاد می‌کند، چرا که خروجی این قسمت به صورت پس‌خور برای بخش‌های دیگر سیستم ناپوری استفاده می‌شود. نکته مهم و اساسی این است که این فرایند باید به صورت آنلاین انجام شود تا در حلقه بسته کنترل سیستم بتوان از آن بهره گرفت. در فعالیت‌های اخیر و جدید ارائه شده برای حذف نویز که



شکل 1 عبور سیگنال از دو فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر



شکل 2 پاسخ ضربه فیلتر بالاگذر موجک هار



شکل 3 پاسخ ضربه فیلتر پایین‌گذر موجک هار

یکی از کاربردهای مهم تبدیل موجک حذف نویز در سیگنال است. روش حذف نویز به این صورت است که ابتدا سیگنال دریافتی را چندین مرتبه تجزیه کرده و سپس روی ضرایب در مراتب مختلف، آستانه‌گذاری انجام داده (به عبارت دیگر ضرایب کوچکتر از یک سطح آستانه معین را صفر کرده) و دوباره سیگنال بازسازی می‌شود. این روش که آبرفتگی ضرایب تجزیه موجک نامیده می‌شود، در ابتدا توسط دونوهو و جان استون ارائه شد. روش‌های مختلفی برای آستانه‌گذاری ارائه شده است که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

## 2-1- روش های آستانه گذاری متداول

روش اول روش استفاده از تابع آستانه‌گذاری سخت است. این تابع را می‌توان به عنوان اولین آستانه‌گذار ارائه شده به حساب آورد. در این روش بر اساس رابطه (7) ضرایب موجک تصحیح می‌شوند  $(\hat{w}_j(k))$  همچنین مقدار آستانه مرزی  $\lambda_j$  و ضرایب تبدیل موجک گسسته ورودی  $w_j(k)$  می‌باشند [9].

$$\hat{w}_j(k) = \begin{cases} w_j(k) & |w_j(k)| \geq \lambda_j \\ 0 & |w_j(k)| < \lambda_j \end{cases} \quad (7)$$

مشاهده می‌شود که این نوع آستانه مرزی، مقادیر کوچکتر از آستانه مرزی را به مقدار صفر و بقیه مقادیر را بدون تغییر به خروجی نگاشت می‌کند، در نتیجه نویزهای کم دامنه حذف و مقادیر با دامنه بیشتر، بدون خطا منتقل می‌شوند. اشکالی که ممکن است رخ دهد، در نتیجه نویزهایی است که دامنه‌های نزدیک به آستانه مرزی داشته باشند، که با کمترین

$$d_{j,k} = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \int f(t) \cdot 2^{\frac{j}{2}} \psi^*(2^j t - k) dt \quad (3)$$

که با تغییر  $j$  ضرایب تجزیه موجک  $(d_{j,k})$  در مراتب مختلف حاصل می‌شود. از دیدگاه فرکانسی، ضرایب تجزیه موجک معادل خروجی های یک بانک فیلتر دو کاناله است که در شکل 1 نشان داده شده است. پیاده‌سازی تبدیل موجک توسط نظریه تجزیه سیگنال‌ها با دقت چندگانه صورت می‌گیرد (که هر موجک  $\psi(t)$  دارای تابع مقیاس  $\phi(t)$  است) و منوط به انتخاب دو فیلتر آینه‌ای تربیعی بالا و پایین‌گذر است. این فیلترها دارای طول مساوی بوده و مجموع حاصل ضرب ضرایب آن دو صفر است که این خاصیت تعامد نامیده می‌شود. روند پردازش تبدیل موجک گسسته چنین آغاز می‌شود؛ در ابتدا سیگنال از یک فیلتر دیجیتال پایین‌گذر نیم باند با پاسخ ضربه  $h[n]$  عبور می‌کند، (شکل 1) و لذا خروجی فیلتر برابر است با کانولوشن ورودی و پاسخ ضربه فیلتر، در نتیجه این عمل فیلترینگ، تمام مؤلفه‌های فرکانسی که بیشتر از نصف بزرگترین فرکانس موجود در سیگنال باشند حذف می‌شوند. از آنجا که بیشترین فرکانس موجود در سیگنال خروجی فیلتر برابر است با  $\pi/2$  با رادیان، نیمی از نمونه‌ها قابل حذف‌اند. لذا با حذف یکی در میان نمونه‌ها، طول سیگنال نصف خواهد شد، بدون این که اطلاعاتی سیگنال از دست رفته باشد. روند مشابهی نیز با استفاده از یک فیلتر دیجیتال بالاگذر نیم باند با پاسخ ضربه  $g[n]$  انجام می‌پذیرد. در نتیجه در خروجی اولین مرحله از اعمال تبدیل موجک، دو نسخه، یکی بالاگذر و دیگری پایین‌گذر، با طول کاهش یافته (نصف شده) از سیگنال اولیه به شکل روابط (4) و (5) به دست می‌آیند [8]:

$$y_{\text{high}}[k] = \sum_n x[n]g[2k-n] \quad (4)$$

$$y_{\text{low}}[k] = \sum_n x[n]h[2k-n] \quad (5)$$

با این عمل، رزولوشن زمانی نصف شده و در مقابل رزولوشن فرکانسی دو برابر می‌شود. این روند را می‌توان مجدداً بر روی نسخه پایین‌گذر شده اعمال نمود و در هر مرحله، با کاهش رزولوشن زمانی به میزان نصف مرحله قبل، رزولوشن فرکانسی را دو برابر کرد. این ایده برای محاسبه تبدیل موجک گسسته، به روش بانک فیلتر مشهور است.

تعامد فیلترها در تبدیل موجک متعامد، موجب کاهش همبستگی بین ضرایب تجزیه موجک شده و نویز را سفید نگه می‌دارد. برای کاهش همبستگی بین ضرایب تجزیه موجک و همچنین سفید ماندن نویز لازم است فیلترها متعامد باقی بمانند و نیز برای سادگی پیاده‌سازی و وجود پایداری مناسب فیلترهای با پاسخ ضربه محدود مورد استفاده قرار گرفته است. فیلتر مورد استفاده موجک هار می‌باشد. موجک هار سری خاصی از توابع است که اکنون به عنوان اولین موجک شناخته می‌شود. این سری اولین بار توسط آلفرد هار، ریاضیدان مجاری در سال 1909 پیشنهاد شد. موجک هار ساده‌ترین موجک با کمترین میزان تأخیر است. موجک مادر هار به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود [9].

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq t < 1 \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (6)$$

همچنین پاسخ ضربه فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر مورد استفاده برای تجزیه سیگنال به صورت شکل‌های 2 و 3 می‌باشد. در اکثر سیستم‌های گسسته برای تجزیه سیگنال از این نوع فیلتر استفاده می‌شود.

DC استفاده کرد که به صورت شکل 5 نمایش داده شده است. به ازای جریان میدان ثابت، گشتاور چرخ مطابق رابطه (12) تعریف می‌شود:

$$T = k_t i \quad (12)$$

که در آن  $K$  ثابت گشتاور موتور چرخ عکس‌العملی و  $i$  جریان آرمیچر است. توجه کنید که در صورت عوض شدن علامت جریان  $i$ ، علامت گشتاور  $T$  نیز عوض می‌شود که به معنی عوض شدن جهت چرخش موتور و در نتیجه چرخ عکس‌العملی می‌باشد. با چرخش آرمیچر ولتاژ مناسب با حاصل ضرب شار و سرعت زاویه‌ای در آرمیچر القا می‌شود. به ازای شار ثابت ولتاژ القا شده  $(e)$  با سرعت زاویه‌ای  $(d\theta/dt)$  مطابق رابطه (13) تناسب مستقیم دارد:

$$e = k_e \frac{d\theta}{dt} \quad (13)$$

که در آن  $e$  نیروی محرکه القایی emf معکوس،  $k_e$  ثابت emf موتور و  $\theta$  جابه‌جایی زاویه‌ای روتور چرخ عکس‌العملی است. در سیستم استاندارد جهانی (SI) ثابت موتور  $(k_t)$  و آرمیچر  $(k_e)$  یکسان در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از قانون کیرشهف معادله دیفرانسیل مدار آرمیچر مطابق رابطه (14) به دست می‌آید.

$$L \frac{di}{dt} + Ri + e = V$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri + k_e \frac{d\theta}{dt} = V \quad (14)$$

همچنین معادله موازنه گشتاورها با استفاده از قانون نیوتن عبارت است از:

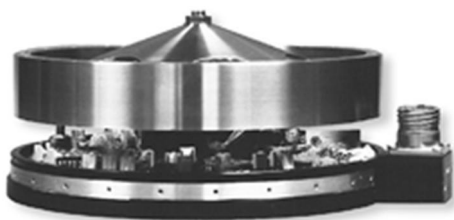
$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + b \frac{d\theta}{dt} = T = k_t i \quad (15)$$

که در آن  $J$  لختی کل موتور و رتور چرخ عکس‌العملی است که به محور منتقل می‌شود و  $b$  ضریب چسبندگی موتور و اتصالات چرخ است که آن هم به محور منتقل می‌شود. تابع تبدیل بین سرعت زاویه‌ای چرخ عکس‌العملی و ولتاژ ورودی از معادلات بالا به صورت رابطه (16) به دست می‌آید [12].

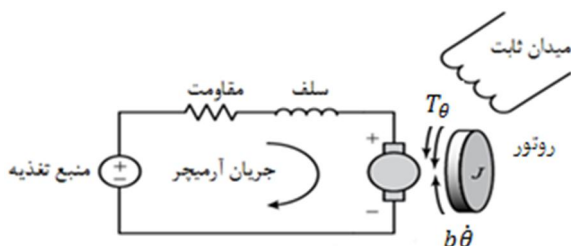
$$\frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{k_t}{(Ls + R)(Js + b) + k_e k_t} \quad (16)$$

پارامترهای انتخابی برای چرخ عکس‌العملی فوق به صورت جدول 1 می‌باشند. در نتیجه تابع تبدیل چرخ عکس‌العملی به صورت رابطه (17) در می‌آید.

$$H(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{40}{s^2 + 12s + 20.4} \quad (17)$$



شکل 4 نمونه‌ای از یک چرخ عکس‌العملی [11]



شکل 5 مدل مدار الکتریکی یک چرخ عکس‌العملی [12]

افزایشی بدون تغییر دامنه عبور می‌کنند و خطا را افزایش می‌دهند. این نوع آستانه مرزی معمولاً به عنوان روشی کم دقت و نامناسب تحلیل می‌شود. روش دوم استفاده از تابع آستانه‌گذاری نرم است. این آستانه‌گذار دارای این تفاوت با تابع سخت است که بر خلاف تابع سخت، که ضرایب بزرگتر از مقدار آستانه در آن بدون تغییر باقی می‌مانند، در آستانه‌گذار نرم، مقدار آستانه از این ضرایب کم می‌شود. این آستانه‌گذار به صورت رابطه (8) می‌باشد.

$$\eta_H(x, \lambda) = \begin{cases} x - thr & x > \lambda \\ 0 & |x| \leq \lambda \\ x + thr & x < -\lambda \end{cases} \quad (8)$$

هر کدام از آستانه‌گذارهای سخت و نرم دارای مزایا و معایبی هستند، به عنوان مثال تخمین‌های آستانه‌گذار نرم دارای بایاس بزرگتری است، زیرا این آستانه‌گذار ضرایب بزرگ را به مقدار آستانه کاهش می‌دهد. همچنین با توجه به ناپیوستگی، تخمین‌های آستانه‌گذار سخت، واریانس بزرگتری داشته و می‌تواند ناپایدار شود، پس نسبت به تغییرات جزئی در داده‌ها حساس است. مشکلی که در تابع آستانه‌گذار سخت وجود داشت در این تابع آستانه‌گذار بر طرف شده است. تنها این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که همواره خروجی این نگاشت، مقداری کمتر از ورودی دارد. که این می‌تواند موجب ایجاد خطا در ورودی‌های غیر نویزی شود. مقدار مناسب حد آستانه را به چندین روش می‌توان تعیین کرد. دونوهو رابطه (9) را برای مقدار حد آستانه پیشنهاد داد [10]:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log(L)} \quad (9)$$

در رابطه (9)  $L$  طول سیگنال است که در مورد تصویر، حاصل ضرب ابعاد آن می‌باشد و  $\sigma$  انحراف معیار نویز است که چون عمدتاً اطلاعی از آن در دسترس نیست، می‌توان از روش‌های تخمین نویز استفاده کرد که از جمله مهم‌ترین و پرکاربردترین این تخمین‌گرها، تخمین گر مد است که در رابطه (10) آورده شده است:

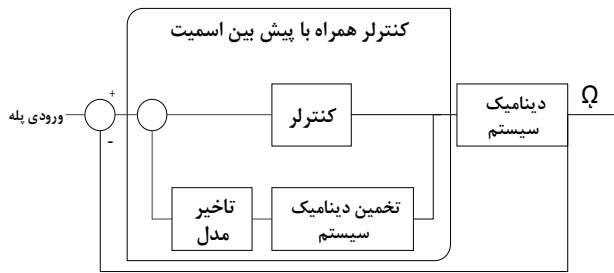
$$\hat{\sigma} = \frac{\text{median}[|Y_{i,j}|; i, j \in HH1]}{0.6745} \quad (10)$$

$HH1$  ضرایب قسمت جزئیات سطح اول حاصل از تجزیه می‌باشد که در صورت رابطه (10) میانه ضرایب زیر باند جزئیات قطری در سطح اول تجزیه منظور شده است. برای سادگی بدست آوردن مقدار آستانه می‌توان از جعبه ابزار موجک موجود در متلب که بر مبنای روابط (9) و (10) استفاده کرد. پس از حذف نویز سیگنال معیاری با عنوان نسبت سیگنال به نویز یا SNR تعریف می‌شود که به صورت نسبت توان سیگنال  $x[n]$  به توان سیگنال نویز  $e[n]$  تعریف می‌شود. هرچه این نسبت بیشتر باشد بهتر است؛ یعنی نویز کمی سیگنال را فرا گرفته است. این نسبت معمولاً به صورت لگاریتمی تعریف و برحسب دسی بل (db) است. نسبت سیگنال به نویز به صورت رابطه (11) تعریف می‌شود که به ترتیب  $\sigma_x^2$  و  $\sigma_e^2$  توان سیگنال و نویز می‌باشند [9].

$$SNR_{dB} = 10 \times \log_{10} \frac{\sigma_x^2}{\sigma_e^2} \quad (11)$$

### 3- دینامیک چرخ عکس‌العملی

یک چرخ عکس‌العملی از دو بخش اصلی تشکیل شده است. یکی از این بخش‌ها روتور و با همان چرخ می‌باشد که قرار است ممان اینرسی لازم  $I\omega$  را فراهم کند و دیگری موتور الکتریکی است که دور لازم  $m$  و تغییر دور (شتاب زاویه‌ای) لازم را تأمین می‌کند. نمونه‌ای از یک چرخ عکس‌العملی در شکل 4 آمده است. برای مدل‌سازی یک چرخ عکس‌العملی می‌توان از یک مدل موتور



شکل 6 بلوک دیاگرام روش اسمیت

زیادی روش اسمیت برای مقاوم نمودن در مقابل نامعینی‌های مختلف و حتی نویزها اصلاح شده است. در ادامه با بیان روشی برای شناسایی سیستم،  $\hat{G}(z)$  شناسایی می‌شود [14].

#### 5- شناسایی به روش حداقل مربعات بازگشتی RLS

شناسایی سیستم با استفاده از روش حداقل مربعات بازگشتی، روشی آنلاین برای تخمین پارامترهای سیستم است. این روش با استفاده از اطلاعات  $t-1$  سیستم پارامترهای سیستم را در زمان  $t$  تخمین می‌زند. روابط (20) تا (22) در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرند [15].

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + K(t)[y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1)] \quad (20)$$

$$K(t) = P(t-1)\phi(t)[I + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)]^{-1} \quad (21)$$

$$P(t) = [I - K(t)\phi^T(t)]P(t-1) \quad (22)$$

در روابط بالا ماتریس  $\phi^T(i)$  ماتریسی است که معلوم می‌باشد و از ورودی‌ها و خروجی‌های مدل تشکیل شده است. ماتریس  $\theta$  پارامترهای نامعلوم مدل هستند که باید شناسایی شوند. در رابطه (20)  $K(t)$  بهره تصحیح‌کننده است. از نکاتی که باید به آن توجه داشت انتخاب اولیه ماتریس کوواریانس  $P$  می‌باشد. معمولاً مقدار اولیه ماتریس کوواریانس مقدار بزرگی انتخاب می‌شود. این روش پارامترهای تابع تبدیل گسسته مدل را تخمین می‌زند، با توجه به این نکته باید تابع تبدیل مدل (رابطه (17)) را از فضای لاپلاس (پیوسته) به فضای تبدل  $Z$  (گسسته) تبدیل شود. تابع تبدیل چرخ عکس‌العملی به صورت گسسته مطابق رابطه (23) است.

$$H(z) = \frac{1.992 \times 10^{-5}z + 1.984 \times 10^{-5}}{z^2 - 1.988z + 0.9881} \quad (23)$$

برای شناسایی مدل نیاز به شناسایی ضرایب تابع تبدیل رابطه (23) می‌باشد. پس از شناسایی ضرایب فوق تابع تبدیل مدل را مطابق رابطه (23) تشکیل داده و در زیر سیستم پیش‌بین اسمیت به عنوان تخمین مدل قرار خواهد گرفت. هر چه شناسایی ضرایب با دقت بالاتری انجام شود دقت استفاده از روش اسمیت بالاتر می‌رود.

#### 6- استراتژی حذف نویز و نتایج شبیه‌سازی

هدف از انجام این تحقیق بکارگیری روش شناسایی با روش پیش‌بین اسمیت در حضور بانک فیلتر موجک است. بدون اینکه اضافه کردن این قسمت باعث ناپایداری سیستم شود. پیاده‌سازی این روش مطابق بلوک دیاگرام شکل 7 می‌باشد.

از یک بانک فیلتر موجک با 6 سطح برای حذف نویز سیگنال خروجی چرخ عکس‌العملی استفاده شده است. فیلتر موجک به کار برده شده در این شبیه‌سازی فیلتر هار است. برای تصحیح ضرایب موجک از تابع آستانه گذر نرم استفاده شده است. مقدار حد آستانه انتخاب شده برای هر سطح در

سه منبع نویز در چرخ‌های عکس‌العملی وجود دارد. اولین منبع نویز در چرخ‌های عکس‌العملی نابالانس بودن چرخ‌ها است، یعنی محور دوران چرخ دارای زاویه‌ای کوچک با حالت بالانس چرخ دارد. این لقی باعث نویز در سیگنال خروجی چرخ عکس‌العملی می‌شود. منبع دوم در ایجاد نویز در خروجی، اغتشاشات بلبرینگ چرخ‌ها است. منبع سوم نویز، نویز ناشی از موتور الکتریکی به کار رفته در این چرخ‌ها می‌باشد. هر یک از منابع نویز بیان شده به سرعت دوران چرخ وابسته‌اند. به غیر از نابالانسی چرخ‌ها بقیه عوامل دارای دامنه کمی هستند، اگر چه می‌توانند به وسیله یکدیگر تقویت شده و باعث ناپایداری شوند [13].

#### 4- الگوریتم پیش‌بین اسمیت

الگوریتمی که در اینجا برای کاهش تأخیر زیر سیستم حذف نویز استفاده شده است، روش پیش‌بین اسمیت است. روش پیش‌بین اسمیت یا SP یکی از روش‌های قدیمی است که هسته اولیه ابداع و به‌کارگیری آن در کنترل فرایندهای شیمیایی بوده است. وجود تأخیر زیاد در چنین فرایندهایی باعث شد که به‌کارگیری سیستم‌های حلقه بسته برای کنترل آن‌ها با چالش حاشیه پایداری مواجه 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 می‌کند و حلقه بسته از تأخیر مصون می‌ماند [14].

مطابق بلوک دیاگرام شکل 6 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 می‌توان بر مبنای روش اسمیت اصلاح کرد. معادلات حلقه بسته برای این روش در ادامه آمده است. فرض می‌شود  $G(z)$  مدل یک سیستم با تأخیر  $T$  باشد، با بکارگیری روش اسمیت مطابق رابطه (18) نتیجه می‌شود:

$$H(z) = \frac{C(z)G(z)}{1 + C(z)G(z)} \quad (18)$$

در معادله (18)  $C(z)$  به صورت رابطه (19) بیان می‌شود:

$$C(z) = \frac{\bar{C}(z)}{1 + \bar{C}(z)\hat{G}(z)(1 - z^{-T})} \quad (19)$$

که در آن  $\bar{C}(z)$  کنترل‌کننده اصلی سیستم بدون ترکیب با روش اسمیت می‌باشد. 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 می‌شود.

مشکل اصلی روش اسمیت به دو پارامتر اصلی این روش برمی‌گردد؛ یعنی تأخیر ایجاد شده  $T$  و مدل دینامیکی انتخاب شده  $\hat{G}(z)$ . اگر این مقادیر دقیق باشند و نامعینی در سیستم 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، به عنوان یک چالش جدی مطرح شود. از این رو تاکنون در فعالیتهای بسیار

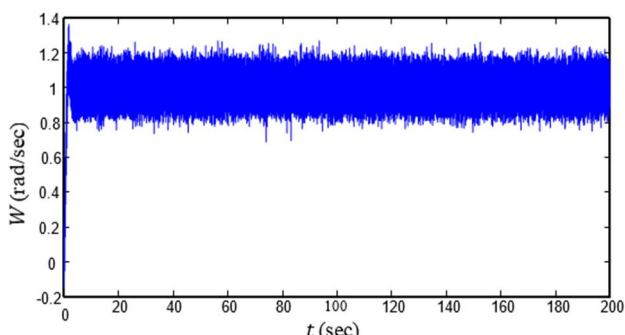
جدول 1 پارامترهای انتخابی چرخ عکس‌العملی

| پارامتر | مقدار |
|---------|-------|
| $R$     | 1     |
| $L$     | 0/5   |
| $k_e$   | 0/01  |
| $k_t$   | 0/2   |
| $j$     | 0/01  |

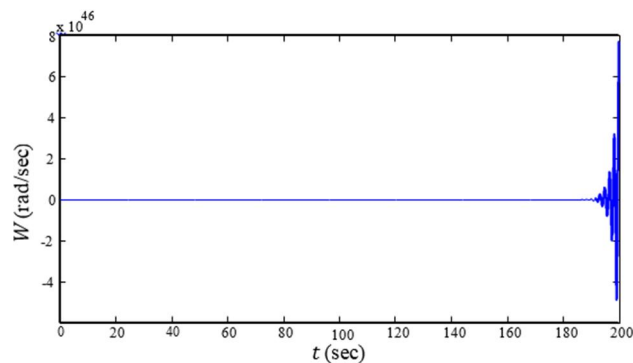
شده به مدل حلقه بسته بدون نویز بسیار نزدیک باشد. مطابق شکل 11 مشاهده می‌شود که علاوه بر حذف بسیار مطلوب سیگنال نویزی خروجی سیستم نیز پایدار شده است. با توجه به رابطه (11) پس از حذف نویز نسبت سیگنال به نویز برابر  $23/97$  دسی‌بل بدست آمد که نشان دهنده کیفیت مناسب حذف نویز است. برای بررسی رفتار سیستم در این حالت با حالت بدون نویز، خطای نمودارهای خروجی عکس‌العملی در حالت سیستم بدون نویز (شکل 8) با سیستم دارای نویز (شکل 9) با استفاده از روش پیش‌بین اسمیت و شناسایی سیستم به روش حداقل مربعات بازگشتی در شکل 12 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود خطای استفاده از این روش در حدود حداکثر  $0/02$  است که بیشتر مربوط به کیفیت حذف نویز است. اما خروجی سیستم چرخ عکس‌العملی کاملاً پایدار می‌باشد. به عبارت دیگر با استفاده از این روش علاوه بر حذف نویز مطلوب، خروجی سیستم نیز پایدار شد.

### 7- بحث و نتیجه‌گیری

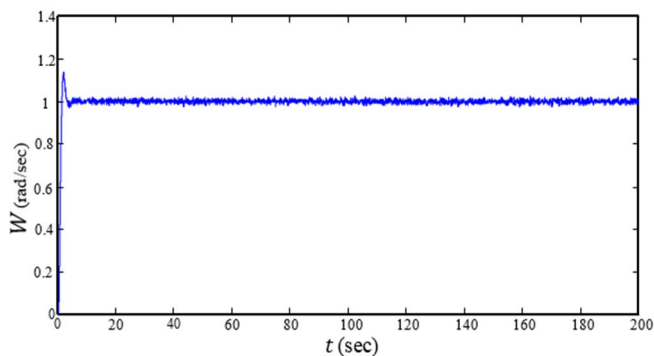
در این مقاله دو الگوریتم هم‌زمان برای تصحیح خروجی سیستم چرخ



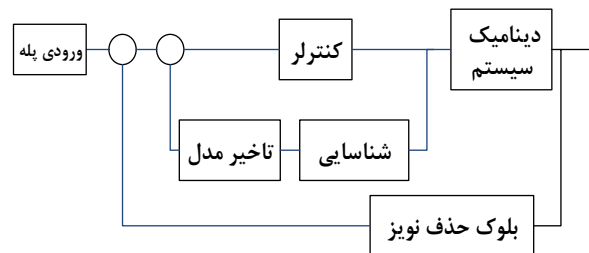
شکل 9 خروجی چرخ عکس‌العملی با نویز



شکل 10 ناپایداری خروجی به علت تأخیر قسمت حذف نویز



شکل 11 خروجی سیستم پس از استفاده از روش اسمیت



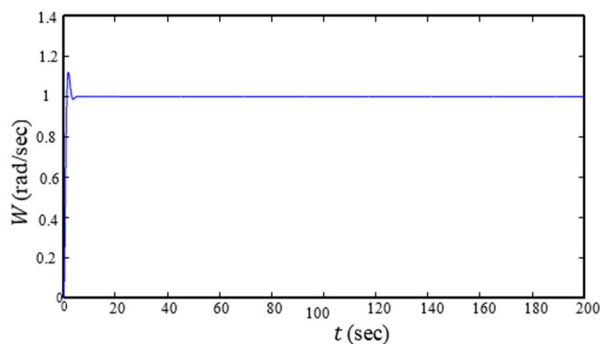
شکل 7 بلوک دیاگرام الگوریتم پیاده‌سازی شده

جدول 2 آمده است. در این مقاله برای بدست آوردن مقدار آستانه از جعبه‌ابزار موجک متلب استفاده شده است. بانک فیلتر شبیه‌سازی شده دارای  $189$  گام تأخیر است که با توجه به اینکه گام نمونه‌برداری شبیه‌سازی برابر  $0/0001$  ثانیه می‌باشد، میزان تأخیر به وجود آمده برابر  $0/189$  ثانیه است. سیستم چرخ عکس‌العملی را بدون حضور نویز مدل کرده و کنترل کننده تناسبی-انتگرال‌گیر برای آن طراحی شده است. خروجی سیستم به صورت منحنی شکل 8 می‌باشد. زمان اجرای شبیه‌سازی  $200$  ثانیه است. محور عمودی نمودارها سرعت زاویه‌ای بر حسب رادیان بر ثانیه و محور افقی زمان بر حسب می‌باشد. با توجه به کم بودن دامنه نویزهای چرخ عکس‌العملی، نویز با حداکثر دامنه  $0/2$  به اضافه شده است. سپس در این حالت خروجی سیستم به صورت منحنی شکل 9 می‌شود.

پس از قرارگیری قسمت حذف نویز، مشاهده می‌شود که به علت تأخیر ناشی از فیلترهای با پاسخ ضربه محدود بکار برده شده در بانک فیلتر موجک باعث ناپایداری خروجی چرخ عکس‌العملی می‌شود (شکل 10). برای حل این مسئله الگوریتم پیش‌بین اسمیت که در بخش 5 توضیح داده شد به همراه روش شناسایی حداقل مربعات بازگشتی به کار برده می‌شود. خطای شناسایی پارامترها برابر  $0/00001$  می‌باشد که حاکی از دقت بالای شناسایی می‌باشد. با توجه به اینکه دقت روش اسمیت به دقت تخمینی که از دینامیک سیستم در دست است، وابسته می‌باشد انتظار می‌رود پاسخ خروجی مدل حذف نویز

جدول 2 مقادیر آستانه هر باند

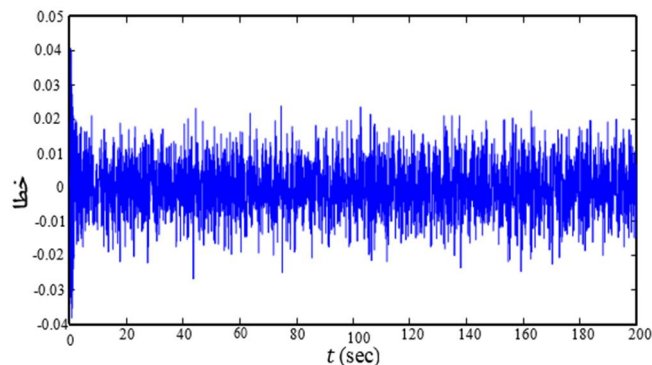
| مقدار آستانه | زیر باند    |
|--------------|-------------|
| 0/265        | $\lambda_1$ |
| 0/274        | $\lambda_2$ |
| 0/276        | $\lambda_3$ |
| 0/262        | $\lambda_4$ |
| 0/257        | $\lambda_5$ |
| 0/222        | $\lambda_6$ |



شکل 8 سیستم چرخ عکس‌العملی بدون نویز



- Vol. 3, pp. 3102- 3108, 2004.
- [2] F. Chaplais, P. Tsiotras and D. Jung, On-Line Wavelet Denoising with Application to the Control of a Reaction Wheel System, *Guidance, Navigation, and Control Conference*, AIAA Paper 04-5345, pp. 1-15, 2004.
- [3] Q., Zhang, R. Rossel and P. Choi, Denoising of gamma-ray signals by interval-dependent thresholds of wavelet analysis, *Measurement Science and Technology*, 17 731, pp. 12-20, 2006
- [4] Y.Hu and C. Loizou, Speech enhancement based on wavelet thresholding the multitaper spectrum, *IEEE Trans. Speech and Audio Processing*, Vol. 12, No. 1, pp. 59-67 ,2004
- [5] S. Chang, B. Yu, and M.z, image de-noising and compression, *IEEE Trans. Image Processing*, vol. 9 ,pp. 1532-1546, Sept. 2000.
- [6] J. Qibing and S. Khursheed, General theory on online wavelets denoising based on moving window, The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering 2013.
- [7] A. Messai, A. Mellit and I. Abdellani, On-line fault detection of a fuel rod temperature measurement sensor in a nuclear reactor core using ANNs, *Elsevier Journal of Progress in Nuclear Energy* 2014
- [8] M. Misiti, Y.M.G. Oppenheim, Jean-Michel Poggi, *Wavelet Toolbox for Use with MATLAB*, Matlab version 2012
- [9] C. Sindy Burrus, Ramesh A. Gopinath, and HaitaoGua, *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*, ISBN 0-13-489600-9, by Prentice-Hall, 1998.
- [10] D.L. Donoho, *De-noising by soft-thresholding*, Trans. Information Theory, pp. 613-627, 1995
- [11] T. Huang, Convex model predictive control for vehicular systems, M.S Thesis Presented to the Faculty of California Submitted June 2014.
- [12] Skilled Systems Inc.(skilledsystems.com), *Reaction Wheel Assembly, Product Overview*, 2012
- [13] R. Pandiyana, A. Ghosalb, D. Kamesha, Passive vibration isolation of reaction wheel disturbances using a low frequency flexible space platform, *Elsevier Journal of Sound and Vibration, Volume 331, Issue 6*, pp. 1310-1330, 2012
- [14] O. J. M. Smith, A controller to overcome dead time, *ISA Journal of Instrument Society of America*, 6, pp. 28-33. 1959
- [15] L. Ljung, *system identification Theory for the User*, Second Edition ,January 8, 1999



شکل 12 خطای روش موجک آنلاین به همراه شناسایی

عکس‌عملی به کار گرفته شد. اولین روش پیاده‌سازی بانک فیلتر موجک 6 سطحه می‌باشد. این بانک فیلتر باعث حذف نویز سیگنال خروجی شده اما به دلیل تأخیر زیاد این بانک فیلتر باعث ناپایداری خروجی سیستم چرخ عکس‌عملی می‌شود. با پیاده‌سازی روش اسمیت این تأخیر به خارج حلقه کنترل انتقال پیدا می‌کند. به عبارت دیگر با پیاده‌سازی روش اسمیت به همراه روش شناسایی حداقل مربعات بازگشتی که برای اولین بار با این روش بکار گرفته شد و بانک فیلتر موجک به صورت هم‌زمان می‌توان سیگنال خروجی را تا حد زیادی تصحیح کرده و خطای کنترل وضعیت ماهواره را به صورت آنلاین بهبود بخشید.

#### 8- مراجع

- [1] F. Chaplais, P. Tsiotras, and Jung, D, Redundant Wavelet Processing on the Half-Axis with Applications to Signal Denoising with Small Delays Theory and Experiments, *43rd IEEE Conference on Decision and Control*.