



## به کارگیری کنترل تطبیقی مدل چندگانه برای تنظیم موقعیت آنتن سیستم ارتباط ماهواره با تأخیر متغیر با زمان در ورودی کنترل

فیروز اللهویردی زاده<sup>1</sup>، علی خاکی صدیق<sup>2</sup>، جعفر روشنیان<sup>3\*</sup>

- 1- دانشجوی دکتری، دینامیک پرواز و کنترل، دانشگاه صنعتی خواجه نصرالدین طوسی، تهران  
 2- استاد، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 3- استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران  
 \* تهران، صندوق پستی 16569-83911، roshanian@kntu.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
 دریافت: 01 آبان 1396  
 پذیرش: 19 آذر 1396  
 ارائه در سایت: 08 دی 1396  
 کلید واژگان:  
 کنترل کننده تطبیقی مدل چندگانه  
 سیستم‌های تأخیردار  
 الگوریتم‌های تخمین تأخیر  
 سونچینگ گسسته و وزن‌دار  
 سیستم ارتباط ماهواره‌ای

### چکیده

در این مقاله، یک روش جدید برای کنترل موقعیت آنتن یک ماهواره با تأخیر متغیر با زمان در ورودی با استفاده از رویکرد کنترل کننده تطبیقی مدل چندگانه پیشنهاد می‌گردد. انتخاب تخمین‌گر مناسب و الگوریتم وزن‌دهی کنترل کننده‌ها با استفاده از خطای تخمین تأخیر، از ویژگی‌های کنترل کننده ارائه شده است. تأخیر در ورودی سیستم باعث انحراف از عملکرد مطلوب شده و در صورتی که تأخیر ناشناخته و متغیر با زمان باشد، احتمال ناپایداری سیستم تحت کنترل وجود دارد. در این موارد می‌بایست تأخیر زمانی را شناسایی و سیگنال کنترل برای مقابله با اثرات نامطلوب آن تنظیم شود. با فرض معلوم بودن مقدار بیشینه تأخیر. تأخیر سیستم به چندین محدوده کوچک‌تر تقسیم شده و برای هر محدوده یک کنترل کننده مناسب تناسبی-انتگرالی جهت تضمین پایداری و بهبود رفتار سیستم حلقه بسته طراحی می‌شود. در حالت بر خط با به کارگیری یک روش موثر و مناسب، تأخیر زمانی سیستم تخمین زده شده و سیگنال کنترل نهایی با استفاده از ترکیب وزنی کنترل کننده‌ها تولید و به سیستم اعمال می‌شود. وزن سیگنال‌های کنترل تابعی از قدر مطلق خطای بین زمان تأخیر تخمینی و متوسط زمان تأخیر واقعی در هر باند می‌باشد. کارایی سیستم کنترل طراحی شده با استفاده از شبیه‌سازی متعدد مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نشان داده می‌شود که سیستم حلقه بسته تحت شرایط مختلف پایدار است. نتایج شبیه‌سازی، کارایی مطلوب سیستم کنترل پیشنهادی نسبت به روش کنترل معمولی تناسبی-انتگرالی را نشان می‌دهد.

## Applying Multiple Model Adaptive Control to Adjustment of Satellite Antenna Position with time varying input delay

Firouz Allahverdizadeh<sup>1</sup>, Ali Khaki Sedigh<sup>2</sup>, Jafar Rowshanian<sup>1\*</sup>

- 1-Department of Aerospace Engineering, Khajeh Nasir Tousi, Tehran, Iran  
 2- Department of Electrical Engineering, Khajeh Nasir Tousi University, Tehran, Iran  
 3- Department of Aerospace Engineering, Khajeh Nasir Tousi University, Tehran, Iran  
 \* P.O.B. 1656983911, Tehran, Iran, roshanian@kntu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
 Received 23 October 2017  
 Accepted 10 December 2017  
 Available Online 29 December 2017

#### Keywords:

Multiple Model Adaptive Control  
 Delay Systems  
 delay time estimation methods  
 weighted switching method  
 Satellite communication

### ABSTRACT

In this paper, a new Multiple Model Adaptive Control (MMAC) is proposed to control of the satellite antenna position with time varying input delay. Selecting of adequate delay estimation method and weighting algorithm using delay estimation error are features of proposed controller. Input delay can be effect on the performance of the closed loop system and if delay time is unknown and time varying, the closed loop system will probably be unstable. At these cases, delay time must be identified to adopt control signal. It is assumed that upper bound of the delay time is known. Delay time is divided into several small bounds and then an adequate PI controller is designed for each bound to guarantee closed loop system performance and stability. In the on-line mode, delay time is identified by adequate estimation algorithm and the control signal is constructed by a weighted sum of the designed controllers output. Control signals weights are a function of the absolute error between the estimated and the average delay time in each bound. Performance of the proposed method and stability of closed-loop system is assessed using several simulations of the system. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed algorithm with respect to conventional PI controller.

### 1-مقدمه

نشان می‌دهد که به کارگیری کنترل تطبیقی در مواردی که تغییرات زیادی در انتظار پارامترهای سیستم باشد، همگرایی کند به همراه خطاهای گذرای بزرگ در پی خواهد داشت. یک شیوه‌ی جایگزین که در سال‌های اخیر توجه قابل ملاحظه‌ای به آن شده است، استفاده از مدل‌های چندگانه برای شناسایی و

در حالت کلی کنترل سیستم براساس پارامترهای تخمین زده شده از آن، یک مسئله‌ی کنترل تطبیقی می‌باشد که در آن پارامترهای کنترل کننده بر مبنای تخمینی از پارامترهای نامعلوم سیستم تنظیم می‌شود. با این وجود، تجربه

### Please cite this article using:

F. Allahverdizadeh, A. Khaki Sedigh, J. Rowshanian, Applying Multiple Model Adaptive Control to Adjustment of Satellite Antenna Position with time varying input delay, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 01, pp. 75-84, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

پاسخ گذرای نامطلوبی نشان دهد و در مواردی می‌تواند باعث ناپایداری سیستم شود. به همین دلایل است که بیشتر الگوریتم‌های کنترل تطبیقی فرض می‌کنند که تأخیرهای زمانی در سیستم‌ها معلوم هستند. در اکثر موارد تأخیر زمانی فرآیند از قبل نامعلوم یا متغیر با زمان است که این موارد انگیزه‌هایی برای محققان ایجاد کرده است تا به دنبال الگوریتم‌هایی ساده و قابل اعتماد برای تخمین تأخیر زمانی باشند. سیستم‌های با تأخیر متغیر با زمان نسبت به سیستم‌های با تأخیر ثابت با زمان مشخصات مختلف قابل توجهی نشان می‌دهند. مدل کردن کارآمد تأخیرهای متغیر با زمان برای به‌کارگیری سیستم‌های کنترلی موثر برای این سیستم‌ها بسیار مهم خواهد بود. برای سیستم‌های با تأخیر متغیر با زمان، نشان داده شده است که پایداری سیستم به مقدار بیشینه مشتق اول تأخیر متغیر با زمان بستگی دارد. مشاهده شده است که زمانی که مشتق اول تابع تأخیر بزرگتر از یک باشد، انحراف قابل توجهی در عملکرد، پایداری و مقاومت سیستم کنترلی به‌وجود می‌آید [24,23]. تخمین تأخیر زمانی برای استفاده در بهبود الگوریتم کنترل از دیرباز مورد توجه بوده است. مراجع مختلفی در این حوزه مطالعه و الگوریتم مناسبی برای استفاده در کنترل کننده پیشنهادی، انتخاب گردید. در [25] یک روند تکرار به واسطه‌ی یک رگرسیون خطی ساده با استفاده از یک فیلتر با ساختاری جدید، پارامترهای مدل و تأخیر را همزمان تخمین می‌زند. در [26] نویسنده با ترکیب الگوریتم شناخته شده‌ی فیلتر کالمن و الگوریتم بازگشتی متغیر کمکی کمترین مربعات، با در نظر گرفتن تقریب پد برای یک تأخیر زمانی نامعین در یک سیستم پیوسته، شناسایی تأخیر را انجام داده است. در [27] برای شناسایی همزمان یک دینامیک گویا و یک تأخیر نامعلوم یا متغیر با زمان، روشی بر مبنای ادغام دو ماژول تخمین متقابل ارائه شده است. تأخیر زمانی از طریق تکنیک همبستگی شناسایی می‌شود. شناسایی دینامیک گویا از طریق شناسایی کمترین مربعات بازگشتی استاندارد انجام می‌گیرد. مقاله‌ی [28] یک شیوه‌ی جدید شناسایی براساس کمترین مربعات بازگشتی استاندارد برای تخمین تأخیر زمانی در سیستم‌های نمونه‌برداری شده‌ی خطی ارائه کرده است. به واسطه‌ی بازبینی توزیع فاز صفر سیستم نمونه‌برداری شده، مقدار تأخیر به‌صورت بازگشتی به‌هنگام می‌شود. در مرجع [29] مسئله تخمین برای سیستم‌های مثبت خطی با تأخیرهای نامعلوم متغیر با زمان به کمک یک نوع خاصی از رویت‌گرهای داخلی از نوع لوانبرگر گسترش یافته مورد مطالعه قرار گرفته است. مرجع [30] شیوه‌ای برای شناسایی پیوسته با زمان تأخیر زمانی در حوزه‌ی لاگوتز با استفاده از پاسخ ضربه پیشنهاد داده است. در مرجع [31] یک روش برای تخمین تأخیر زمانی در سیستم‌های دینامیکی خطی نامتغیر با زمان پیوسته که از فاز قسمت تمام گذر مدل سیستم استفاده می‌کند، پیشنهاد شده است. در مرجع [32] از روش فراپارامتریزه کردن پارامترها برای شناسایی پارامترهای سیستم و بویژه تأخیر استفاده شده است. این روش هم برای سیستم‌های تک ورودی / تک خروجی و هم برای سیستم‌های چند ورودی / چند خروجی قابل استفاده است. در مرجع [33] یک روش سریع برای شناسایی تأخیر زمانی سیستم برای استفاده در کاربردهای عملی به کار رفته است. این روش بر پایه ایده تخمین توزیعی غیرمجانبی استوار است. طراحی کنترل کننده در حضور تأخیر متغیر با زمان از مسائل نسبتاً پیچیده کنترلی است. در مقالات [35-37] طراحی کنترل کننده در حضور تأخیر متغیر با زمان در ورودی کنترل مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، یک روش جدید برای کنترل موقعیت آنتن یک ماهواره با

کنترل سیستم نامعلوم است که به‌عنوان سطح بالاتری از کنترل تطبیقی تلقی می‌شود. در هر لحظه از زمان، مدلی که انطباق بیشتری با رفتار سیستم دارد، مشخص و کنترل‌کننده متناظر با آن برای کنترل مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌ها و کاربردهای عملی، نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر این شیوه نسبت به کنترل تطبیقی معمولی است [1].

استفاده از مدل‌های چندگانه‌ی تطبیقی برای شناسایی، موضوع جدیدی نیست. در دهه‌های 1960 و 1970 افرادی چون مگیل، لینیوتیس و اتنز مدل‌های مبتنی بر فیلتر کالمن را برای بهبود دقت تخمین حالت‌های سیستم در مسائل کنترلی مورد مطالعه قرار داده‌اند [2-6]. کاربردهای عملی موفق زیادی براساس این روش‌ها در سال‌های 1992 تا 2016 گزارش شده است [7-11]، که در بیشتر آن‌ها ورودی کنترلی به صورت یک ترکیبی معین از مدل‌های مختلف محاسبه می‌شود و سوئیچ کردن کنترل کننده‌ها کمتر استفاده شده است. در زمینه‌ی کنترل تطبیقی، سوئیچ کردن ابتدا توسط مارتنسون پیشنهاد شد [12]. روش نخست که به‌عنوان سوئیچینگ مستقیم شناخته می‌شود، زمان سوئیچ به خروجی مدل بستگی دارد [13]. همچنین در مقالات [14,15] روش سوئیچ مستقیم پیشنهاد شده است. اما بعداً مشخص شد که این شیوه کاربرد عملی کمی دارد. روش دوم که به‌عنوان سوئیچینگ غیرمستقیم شناخته می‌شود، چندین مدل برای مشخص‌سازی زمان و کنترل کننده‌ای که در هر لحظه از زمان باید به آن سوئیچ شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد [16-19]. این روش برای کاربردهای عملی مناسب‌تر است.

در بخش‌های بعدی سیستم به‌صورت گسسته مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سه دلیل اصلی برای در نظر گرفتن سیستم‌ها به صورت گسسته وجود دارد، اول آن‌که اکثر سیستم‌های پیچیده با استفاده از رایانه‌های دیجیتال کنترل می‌شوند که می‌تواند یک دلیل قانع کننده برای گسسته در نظر گرفتن کنترل تطبیقی باشد. دلیل مهم‌تر برای این موضوع آن است که در حقیقت به دلیل وجود نویز تصادفی در سیستم، ساده‌تر است که با سیستم به صورت تصادفی رفتار شود. از آنجایی که اکثر سیستم‌ها باید در حضور نویز به عملکرد خود ادامه دهند، پایداری و عملکرد کنترل تطبیقی چندگانه در چنین زمینه‌هایی قابل فهم‌تر خواهد بود.

مسئله مهم دیگری که در این مقاله موردنظر است، وجود تأخیر زمانی در سیستم‌ها است. تأخیرهای زمانی در بسیاری از سیستم‌های واقعی امری طبیعی هستند (به‌عنوان مثال: تأخیرهای انتقال سیگنال در سیستم‌های مخابراتی و تأخیرهای انتقال در لوله‌ها و خط تولید کارخانه‌های تولید ورق آهن و فولاد، تأخیر در عملگرهای مکانیکی و ...). طراحی کنترل کننده‌های مناسب برای چنین سیستم‌هایی شدیداً بستگی به اطلاعات در مورد تأخیرها دارد. مشخص شده است که حساسیت رفتار سیستم کنترل به تأخیر زمانی بسیار بیشتر از سایر پارامترهای سیستم است. در مقاله [20] یک کنترل کننده PID پیش بین تطبیقی با استفاده از شبکه عصبی برای کنترل یک سیستم با تأخیر زمانی بزرگ مورد استفاده قرار گرفته و نشان داده شده است که سیستم حلقه بسته از مقاومت بالاتری نسبت به کنترل کننده‌های معمولی برخوردار است. در مرجع [21] از روش کنترل کننده فیدبک تأخیر زمانی برای پایداری‌سازی یک سیستم ناپایدار استفاده شده است. در مقاله [22] با استفاده از یک کنترل کننده شبکه عصبی تطبیقی برای کنترل و پایداری‌سازی یک سیستم غیرخطی تأخیردار استفاده شده است. اگر تأخیر زمانی که بر مبنای آن کنترل کننده طراحی شده است، در محدوده‌ی تأخیر زمانی واقعی سیستم قرار نداشته باشد، ممکن است سیستم کنترل حلقه بسته مشخصات

$$y(t) = \frac{\hat{B}^*(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t) \quad (5)$$

که در آن  $\hat{B}^*(z^{-1})$  به صورت معادله (6) و  $d_{\max}$  کران بالای شاخص زمانی تأخیر فرآیند است.

$$\hat{B}^*(z^{-1}) = b_1^* z^{-1} + \dots + b_{m+d_{\max}}^* z^{-(m+d_{\max})} \quad (6)$$

چنانچه تابع تبدیل تخمین زده شده به صورت زیر باشد:

$$\hat{G}^{-1}(z^{-1}) = \frac{\hat{B}^*(z^{-1})}{\hat{A}(z^{-1})} = \frac{b_1^* z^{-1} + \dots + b_{m+d_{\max}}^* z^{-(m+d_{\max})}}{1 + \hat{a}_1 z^{-1} + \dots + \hat{a}_n z^{-n}} \quad (7)$$

آن گاه پارامترهای این مدل تغییر یافته با استفاده از RLS تخمین زده می شود:

$$\hat{\theta}(k) = [\hat{a}_1(k) \dots \hat{a}_n(k) \quad b_1^*(k) \dots b_{m+d_{\max}}^*(k)] \quad (8)$$

چنانچه تنها تأخیر سیستم نامعلوم باشد و سایر ضرایب صورت و مخرج تابع تبدیل سیستم معلوم باشند، بردار پارامترهای  $\hat{\theta}(k)$  تنها چند جمله ایی گسترش یافته ی ضرایب تأخیر را شامل خواهد شد:

$$y(t) = z^{-d} u'(t) \quad (9)$$

$$u'(t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} u(t) \quad (10)$$

با فرآیند متریزه نوشتن رابطه ی (10) برای در برگرفتن حداکثر مقدار تأخیر، بدست می آید:

$$y(t) = (b_1^* z^{-1} + \dots + b_{d_{\max}}^* z^{-d_{\max}}) u'(t) \quad (11)$$

چنانچه به ازای حداکثر مقدار تأخیر سیستم، ناپایداری برای سیستم حلقه بسته ایجاد نمی شود، می توان با در نظر گرفتن شاخص مربوط به کمترین توان به عنوان تأخیر سیستم، کنترل کننده ی متناظر با آن را در حلقه کنترلی به کار گرفت تا هزینه ی کنترلی کمتری تحمیل شود و احیاناً پاسخ سریع تری به دست آید. در حالی که اگر احتمال ناپایداری سیستم به ازای کنترل کننده های مربوط به باندهای پایین تر وجود داشته باشد، می توان کنترل کننده ی مربوط به شاخص بیشترین توان تأخیر را در حلقه کنترلی مورد استفاده قرار داد هر چند که ممکن است در تأخیرهای پایین تر سبب کندی پاسخ خروجی شود و هزینه ی کنترلی را افزایش دهد.

رابطه ی (11) را می توان به صورت رابطه ی رگرسوری (12) بازنویسی کرد:

$$A(z^{-1}) u'(z) = B(z^{-1}) u(z) \quad (12)$$

که در آن

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \quad (13)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m} \quad (14)$$

و در حالتی که تنها تأخیر سیستم نامعلوم باشد، رابطه ی (11) به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$y(t) = b_1^* u'(t-1) + \dots + b_{d_{\max}}^* u'(t-d_{\max}) \quad (15)$$

که برای آن ماتریس رگرسور:

$$\phi(t-1) = [u'(t-1) \dots u'(t-d_{\max})] \quad (16)$$

و بردار پارامترهای نامعلوم، ضرایب نامعلوم مربوط به شاخص های توانی تأخیر سیستم را شامل می شود:

$$\theta = \begin{bmatrix} b_1^* \\ \vdots \\ b_{d_{\max}}^* \end{bmatrix} \quad (17)$$

### 3- کنترل تطبیقی و تخمین

پیش از پرداختن به مسأله ی کنترل تطبیقی با استفاده از مدل های چندگانه،

تأخیر متغیر با زمان در ورودی کنترل با استفاده از رویکرد کنترل کننده تطبیقی مدل چندگانه مورد بررسی و مطالعه قرار می گیرد. انتخاب تخمینگر مناسب و الگوریتم وزن دهی کنترل کننده ها با استفاده از خطای تخمین تأخیر، از ویژگی های کنترل کننده ارائه شده است. سیستم تحت کنترل خطی و نامتغیر با زمان و تأخیر ورودی متغیر با زمان و با بیشینه معلوم در نظر گرفته شده است.

در ادامه ضمن مدل سازی عمومی مسئله در بخش دوم، مختصری در خصوص کنترل کننده تطبیقی مدل چندگانه و انتخاب روش مناسب برای تخمین تأخیر متغیر با زمان و نیز معماری سیستم کنترل پیشنهادی بحث خواهد شد. در بخش چهارم ضمن مدل سازی مسئله مورد نظر که یک سیستم ارتباط ماهواره ای است، تأخیر سیستم به چهار باند کوچک تر تقسیم و کنترل کننده های انتگرالی - تناسبی برای هر کدام طراحی می گردد. شبیه سازی سیستم کلی با استفاده از نرم افزار سیمولینک انجام و نهایتاً نتایج شبیه سازی ارائه می شود. با انجام شبیه سازی حساسیت سیستم کنترل طراحی شده به تغییر ویژگی های تأخیر ورودی و مقاوم بودن آن در برابر این تغییرات مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده می شود که سیستم حلقه بسته تحت این شرایط پایدار است. همچنین عملکرد سیستم تحت کنترل در حضور کنترل کننده جدید (کنترل کننده تطبیقی مدل چندگانه) با کنترل کننده انتگرالی - تناسبی مقایسه می شود.

### 2- مدل سازی و بیان مسئله

مدل دینامیکی یک سیستم خطی در حضور تأخیر متغیر با زمان توصیف می گردد. همچنین در این قسمت مسئله ی شناسایی و کنترل مورد بحث، تعریف و فرضیات در نظر گرفته شده بیان می شود. بیان مسئله به شکل مناسب، برای به کارگیری الگوریتم های تخمین، از اهداف پیش رو در این بخش خواهد بود.

در حالت کلی یک سیستم دینامیکی خطی نامتغیر با زمان در حضور تأخیر ورودی متغیر با زمان به صورت فضای حالت توسط معادله ی دیفرانسیلی به شکل رابطه (1) قابل بیان است:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau(t)) \\ y(t) = C^T x(t) \end{cases} \quad (1)$$

که در آن ماتریس  $A \in R^{n \times n}$  و بردارهای  $B \in R^{m \times r}$  و  $C \in R^{n \times l}$  همگی ثابت و معلوم فرض می شوند. سیستم فوق یک نمایش معادل ورودی/خروجی به شکل رابطه (2) خواهد داشت [25]:

$$y(t) = G(s)u(t - \tau(t)) \quad (2)$$

که در آن  $G$  تابع تبدیل سیستم بدون تأخیر می باشد. با گسسته سازی سیستم فوق با یک زمان نمونه برداری مناسب، نمایش معادلی در حوزه ی گسسته به شکل معادله (3) به دست خواهد آمد:

$$y(t) = -a_{n-1}y(t-n) - \dots - a_0y(t-1) + b_m u(t-m-d) + \dots + b_0 u(t-d) \quad (3)$$

که در آن  $d = \tau/T$  و  $T$  زمان نمونه برداری از سیستم است. در حالت تابع تبدیل گسسته:

$$y(t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d} u(t) \quad (4)$$

با توجه به نامعلوم بودن مقدار تأخیر واقعی سیستم، با ترکیب توانی مربوط به تأخیر در رابطه ی فوق با سایر ضرایب موجود در صورت تابع تبدیل، می توان به رابطه ی (5) رسید:

آلگوریتم‌های مختلف تخمین پارامترهای ناشناخته سیستم معرفی می‌شوند. انتخاب الگوریتم تخمین مناسب نقشی کلیدی در پایداری سیستم کلی ایفا می‌کند. در ادامه این بخش دو شیوه مبتنی بر الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی برای استفاده در کاربرد پیش رو مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

### 1-3- تخمین پارامترها

رابطه‌ی:

$$y(t) = \phi^T(t-1)\theta \quad (18)$$

که در آن  $\phi$  و  $\theta$  به ترتیب بردارهای رگرسیون و پارامتر نامعلوم هستند که تخمین زده می‌شوند.  $y(t)$  خروجی اندازه‌گیری شده‌ی سیستم است. هدف روش‌های تخمین، تخمین بردار نامعلوم با استفاده از داده‌های در دسترس است. الگوریتم‌های شناخته شده برای تخمین  $\theta$  صورت کلی زیر را دارند:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + M(t-1)\phi(t-1)e(t) \quad (19)$$

که در آن  $M(t-1)$  ماتریس عامل ضربی خواهد بود و  $e(t)$  خطای پیش‌بین بوده و به صورت معادله (20) تعریف می‌شود.

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) = y(t) - \phi^T(t-1)\hat{\theta}(t-1) \quad (20)$$

در هر لحظه از زمان، تخمین  $\hat{\theta}(t-1)$  برای محاسبه‌ی مقدار پیش‌بین  $\hat{y}(t)$  از خروجی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد و بر مبنای خطای بین آن‌ها، تخمین پارامترها بروزرسانی می‌شود. انتخاب‌های مختلف برای  $M(t-1)$  الگوریتم‌های تخمین مختلفی را پیش‌رو می‌گذارد. یک الگوریتم می‌بایست در عین داشتن عملکرد سریع در حضور اغتشاشاتی نظیر نویز، مقاوم هم باشد. به عنوان مثال الگوریتم تصویرسازی با  $M(t) = 1/\phi^T(t)\phi(t)$  الگوریتم تصویرسازی تغییر یافته برای از بین بردن احتمال تقسیم بر صفر و الگوریتم تصویرسازی متعامد برای اطمینان از همگرایی در تعداد مرحله‌های محدود ارائه می‌شوند. به نظر می‌آید الگوریتم تصویرسازی متعامد نسبت به بقیه برتری دارد، با این وجود مشخص شده است که این الگوریتم شدیداً به نویز حساس است. الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی چنین الگوریتمی است که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم به شکل زیر است:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + P(t-1)\phi(t-1)e(t) \quad (21)$$

که ماتریس  $P(t)$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P(t-1) = P(t-2) - \frac{P(t-2)\phi(t-1)P(t-2)}{1 + \phi^T(t-1)P(t-2)\phi(t-1)} \quad (22)$$

مقدار اولیه‌ی  $\hat{\theta}(0)$  معلوم فرض می‌شود و  $P(-1)$  هر ماتریس مثبت معین  $P_0$  خواهد بود. لم 1 خواص مهم الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی در مسئله‌ی تخمین را بیان می‌کند.

**لم 1:** سیستم بیان شده با رابطه‌ی (18) را در نظر بگیرید، چنانچه الگوریتم کمترین مربعات بازگشتی توصیف شده با روابط (21) و (22) برای بروزرسانی پارامترهای نامعلوم سیستم مورد استفاده قرار گیرد، نتایج زیر به دست می‌آید:

$$\|\hat{\theta}(t) - \theta_0\|^2 \leq k_1 \|\hat{\theta}(t) - \theta_0\|^2, \quad t \geq 1 \quad (23)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{\tau=1}^t \frac{e(\tau)^2}{1 + \phi^T(t-1)\phi(t-1)} < \infty \quad (24)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{e(\tau)^2}{[1 + \phi^T(t-1)\phi(t-1)]^{\frac{1}{2}}} = 0 \quad (25)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\hat{\theta}(t) - \hat{\theta}(t-k_2)\| = 0 \quad (26)$$

که  $k_1, k_2 > 1$  هر عدد متناهی می‌باشد. برای اثبات روابط فوق به مرجع [34]

مراجعه شود. از رابطه‌ی (23) نتیجه می‌شود که خطای تخمین پارامترها کراندار است. از رابطه‌ی (24) نیز مشخص است که اگر بردار رگرسیون به صورت بی‌کران رشد کند، خطای پیش بین با سرعت کندتری رشد خواهد کرد. رابطه‌ی (26) نشان می‌دهد که تغییر در مقدار پارامترها در تعداد محدودی مرحله به صفر همگرا می‌شود، از این رو بعد از تعداد معینی مرحله، مقدار پارامترهای تخمین زده شده، ثابت خواهد شد [1].

روش دیگری که برای تخمین تأخیر به کار گرفته شده است، روش لیاپانوف است که معادلات مربوطه در روابط (27) و (28) ارائه گردیده است. برای مطالعه بیشتر به [27] مراجعه شود.

$$\dot{\hat{t}} = -\frac{p(t)\dot{u}(t-\hat{t})}{1 + p(t)\dot{u}^2(t-\hat{t})}(u(t-\tau) - u(t-\hat{t})) \quad (27)$$

که در آن تابع  $p$  حل مثبت یکتا از معادله‌ی دیفرانسیلی

$$p = \eta \frac{p^2(t)\dot{u}^2(t-\hat{t})}{1 + p(t)\dot{u}^2(t-\hat{t})}, \quad p(0) = p_0 > 0 \quad (28)$$

برای  $\eta$  و  $p_0$  ثابت مثبت خواهد بود.

هدف مسئله‌ی کنترل تطبیقی یافتن یک ورودی کنترل کراندار  $u(t)$  است به گونه‌ای که خروجی  $y(t)$  سیستم در حالت حلقه بسته به صورت مجانبی یک ورودی مرجع کراندار دلخواه  $r(t)$  را دنبال کند و یا به بیان ریاضی:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y(t) - r(t)| = 0 \quad (29)$$

در شیوه‌های کلاسیک، یک مدل شناسایی یکتا برای تخمین پارامترهای ناشناخته سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد، که به دنبال آن از این اطلاعات برای تولید یک سیگنال کنترلی استفاده می‌شود. در شیوه‌ی مدل چندگانه، شناسایی سیستم در یکی از مدل‌های مربوط به وضعیت کنونی سیستم، مبنای انتخاب کنترل کننده‌ی مناسب برای رسیدن به پاسخ مطلوب در وضعیت شناسایی شده است. مشاهده شده است عملکرد سیستم‌های تأخیردار با تأخیر متغیر با زمان وابسته به مشتق اول تأخیر ورودی است، فرض زیر روی تغییرات زمانی تأخیر در نظر گرفته می‌شود. [24,23]:

$$\frac{d\tau(t)}{dt} < 1 \quad (30)$$

با این فرض می‌توان باندهایی به "شکل 1" برای تأخیر تعریف کرد:

با توجه به "شکل 1" هر باند در محدوده‌ی زمانی مختص به خود به خوبی تأخیر سیستم را پوشش می‌دهد. با تخمین این باندها، کنترل کننده‌ی مناسب باید به گونه‌ای سیستم حلقه بسته را نسبت به کران بالای تأخیر به صورت مقاوم پایدار سازد که عملکرد مطلوب تا حد امکان با اتلاف انرژی کمتر همراه باشد. این خواسته به واسطه‌ی قوانین سوئیچینگ مناسب و امن امکان‌پذیر خواهد بود.

### 3-2- معماری سیستم کنترل تطبیقی مدل چندگانه برای سیستم

#### خطی نامتغیر با زمان با تأخیر متغیر با زمان

کنترل سیستم‌های خطی با تأخیر متغیر با زمان در ورودی همواره جزء مسائل و مباحث مورد علاقه مهندسان کنترل بوده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، اکثر سیستم‌های ارتباطی راه دور و نیز سیستم‌های دینامیکی به دلیل استفاده از عملگرهای مکانیکی دارای تأخیر در ورودی کنترل هستند. در بیشتر موارد تأخیر ناشناخته و در مواردی متغیر با زمان است. در مرجع [35] جبران‌سازی اثر تأخیر متغیر با زمان ناشناخته در ورودی یک سیستم دینامیکی مورد توجه قرار گرفته است. آقای پیرکین و همکارانش در مرجع [36] کنترل تطبیقی یک سیستم خطی با عدم قطعیت پارامتری و تأخیر

ساختار مدل‌ها و کنترل کننده‌ها به همراه پارامترهای آن‌هاست. مسئله‌ی کنترلی مشخص کردن قوانین مناسب برای سوئیچینگ و تنظیم کردن مناسب این پارامترها به منظور دستیابی به بهترین عملکرد برای اهداف مورد نظر است به طوری که پایداری تضمین شود. معماری توصیف شده در این بخش نسبتاً عمومی و برای سیستم‌های خطی و غیرخطی قابل اعمال است. با این وجود در این مقاله سیستم تحت کنترل، خطی فرض می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد، برای اجتناب از اثرات نامطلوب سوئیچینگ مستقیم کنترل کننده‌ها، از یک روش مناسب برای تنظیم وزن کنترل کننده‌ها استفاده می‌شود. سیگنال کنترل مناسب برای کنترل سیستم، ترکیب وزنی خروجی کلیه کنترل کننده‌ها به صورت رابطه زیر می‌باشد.

$$u = \sum_{i=1}^N \alpha_i u_i \quad (31)$$

وزن کنترل کننده‌ها تابعی از قدر مطلق خطای بین مقدار متوسط باندهای تاخیر و مقدار تاخیر تخمینی می‌باشد. روشن است که هر چه خطای تخمین به مقدار متوسط تاخیر هر باند نزدیک باشد، کنترل کننده متناظر با آن باند با وزن بیشتری در تولید سیگنال کنترل سیستم شرکت می‌کند. یک رابطه مناسب برای تولید وزن کنترل کننده‌ها به صورت رابطه (32) می‌باشد.  $\sigma$  پارامتر طراحی است که با آن می‌توان سرعت مرحله گذرا قابل تنظیم است. هر چه مقدار  $\sigma$  بزرگتر انتخاب شود، وزن کنترل کننده‌ها سریع‌تر به مقدار نهایی همگرا می‌شوند. در واقع وزن کنترل کننده متناظر با خطای کمینه به مقدار یک و بقیه به مقدار صفر همگرا می‌شوند. در صورتی که  $\sigma$  خیلی بزرگ انتخاب شود، به سوئیچینگ مستقیم نزدیک خواهیم شد.

$$\alpha_i = \frac{e^{-\sigma|e_i|}}{\sum_{j=1}^n e^{-\sigma|e_j|}} \quad (32)$$

#### 4- شبیه‌سازی و ارزیابی نتایج

در "شکل 3" ماهواره‌ای برای ارسال اطلاعات از ایستگاهی زمینی به مقصد، نیاز به قرار گرفتن در موقعیت مناسب بین ایستگاه مبدأ و مقصد با جهت‌گیری مناسب برای آنتن‌های خود دارد که این هدف با کنترل موتورهای الکتریکی داخلی به دست می‌آید به گونه‌ای که حرکت و چرخش این موتورها با توجه به قانون پایستگی اندازه‌ی حرکت زاویه‌ای، چرخش بدنه‌ی ماهواره در جهت مخالف را در پی خواهد داشت. اطلاعات لازم برای کنترل این سیستم از خروجی‌های زاویه یا سرعت زاویه‌ای موتورهای الکتریکی به دست می‌آید و سیگنال کنترلی گشتاور اعمالی به موتور خواهد بود. معادلات دینامیکی موتور الکتریکی dc با ورودی گشتاور و خروجی سرعت زاویه‌ای به صورت زیر خواهد بود:

$$J\ddot{\gamma} + 2z\dot{\gamma} + 2y\gamma = \dot{u}(t - \tau) + 2u(t - \tau) \quad (33)$$

که در آن  $\gamma$  سرعت زاویه‌ای و  $u$  گشتاور اعمالی خواهد بود در حالی که  $\tau$  تأخیر زمانی بین سیگنال ارسال کنترلی و عکس العمل موتور را نشان می‌دهد. با توجه به کندی عملگرها در پاسخ به یک سیگنال و زمان لازم برای پردازش اطلاعات دریافتی همواره تأخیری بین 2 تا 3 ثانیه قابل انتظار است. بسته به شرایط جوی سرعت انتقال امواج الکترومغناطیس بین  $(3 - 2.5) \times 10^5$  km/s متغیر خواهد بود که حداکثر 1 ثانیه زمان برای دریافت اطلاعات نیاز خواهد داشت.

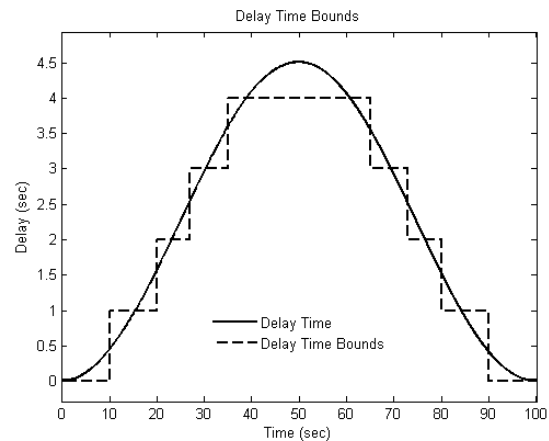


Fig. 1 Dividing delay time into small bounds

شکل 1 نحوه تقسیم تاخیر متغیر با زمان به محدوده‌های کوچک

ثابت در ورودی کنترل در حضور اغتشاش را مورد مطالعه قرار داده‌اند. همچنین در مرجع [37] کنترل تطبیقی مقاوم برای کنترل یک سیستم غیرخطی نامعین با تأخیر متغیر با زمان به کار گرفته شده است. در این مقاله به دنبال بکارگیری کنترل تطبیقی با رویکرد مدل چندگانه برای کنترل یک سیستم خطی با تأخیر متغیر با زمان در ورودی هستیم. ساختار پیشنهادی برای حل این مسئله به صورت "شکل 2" می‌باشد. با توجه به "شکل 2" سیستم توسط ورودی  $u(t)$  کنترل می‌شود در حالی که خروجی سیستم  $y(t)$  خواهد بود. هدف آن است که خطای کنترل  $e_c = r - y$  به صفر همگرا شود.  $r$  سیگنال ورودی مرجع است که باید خروجی آن را به طور مطلوب دنبال کند. سیستم کنترلی شامل تعدادی کنترل کننده متناظر با باندهای تأخیر، بلوک تخمین تأخیر و یک بخش نظارتی برای تنظیم وزن کنترل کننده‌ها و سوئیچینگ بین آن‌ها است.

خطای شناسایی بین خروجی سیستم تخمین‌گر و مقدار متوسط تاخیر هر باند  $e_j = \hat{t}_j - \bar{t}$  خواهد بود. متناظر با خطای تأخیر  $(e_j)$ ، یک کنترل کننده‌ی پارامتریزه شده‌ی  $C_j$  وجود دارد که بردار پارامترهای آن  $\theta_j$  به گونه‌ای انتخاب می‌شود که کنترل کننده‌ی متناظر با آن به هدف کنترلی برای مدل شناسایی شده‌ی متناظر با آن خواهد رسید در حالی که خروجی این کنترل کننده  $u_j$  خواهد بود. در هر لحظه از زمان که یکی از مدل‌های شناسایی شده توسط قانون سوئیچینگ انتخاب می‌شود و کنترل کننده‌ی متناظر با آن ورودی کنترلی را به سیستم اصلی اعمال می‌کند. با در اختیار داشتن اطلاعات اولیه از وضعیت‌های مختلف ممکن برای سیستم، مسئله‌ی طراحی، انتخاب تعداد و

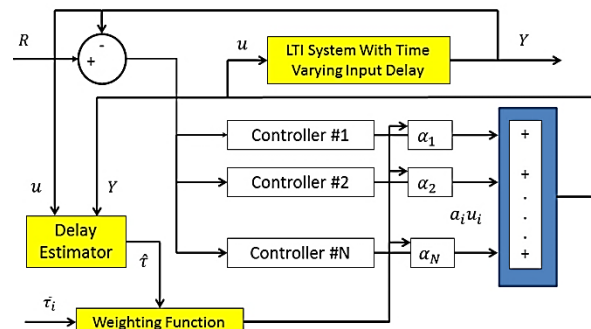
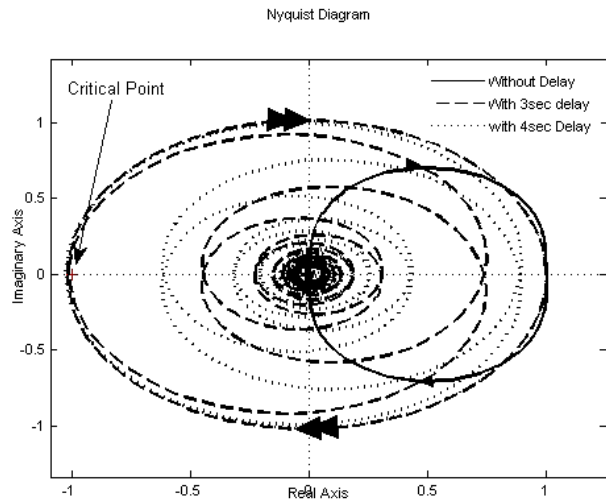


Fig. 2 Multiple model adaptive control block diagram

شکل 2 دیاگرام بلوکی سیستم کنترل تطبیقی با رویکرد مدل چندگانه



**Fig. 6** Nyquist diagram of system under 3 and 4 second delay  
شکل 6 نمودار نایکوئیست به ازای تأخیر 3 و 4 ثانیه

با توجه به "شکل 5" و "شکل 6" با افزایش تأخیر، سیستم به سمت نقطه‌ی بحرانی می‌رود و به ازای تأخیر 3 و 4 ثانیه سیستم با عبور از نقطه‌ی بحرانی ناپایدار خواهد شد. با طراحی کنترلرهای معمول و متداول تناسبی-مشتق-گیر-انترگرالی می‌توان فازی مثبت به سیستم افزود و از این طریق فاز منفی-ایی که در اثر تأخیر به سیستم تحمیل می‌شود را جبران کرد. برای سیستم مورد مطالعه در این مقاله، کنترلرهای تناسبی-انترگرالی به‌صورت زیر طراحی و در شبیه‌سازی‌هایی که ارائه می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$\begin{cases} 0.5 \leq \tau(t) < 1.5 \Rightarrow K(s) = 0.12 + \frac{0.25}{s} \\ 1.5 \leq \tau(t) < 2.5 \Rightarrow K(s) = 0.15 + \frac{0.20}{s} \\ 2.5 \leq \tau(t) < 3.5 \Rightarrow K(s) = 0.18 + \frac{0.15}{s} \\ 3.5 \leq \tau(t) < 4.5 \Rightarrow K(s) = 0.20 + \frac{0.10}{s} \end{cases} \quad (36)$$

که هر یک، حد‌فازی بین 50 تا 60 درجه به سیستم حلقه بسته می‌دهند. با استفاده از رابطه‌ی (27) برای تخمین تأخیر متغیر با زمان و با توجه به قانون سوئیچینگ (32) به ازای  $\sigma = 5$  برای انتخاب کنترلرهای موجود، "شکل 7" تأخیر شناسایی شده را به خوبی نشان می‌دهد. در عین حال خروجی سیستم حلقه بسته سیگنال مرجع را که تغییر مداومی برای زاویه‌ی ماهواره به‌منظور قرار گرفتن آنتن در جهت مبدأ و مقصد اطلاعات ایجاد می‌کند، به خوبی ردیابی می‌کند. در "شکل 8" نتایج شبیه‌سازی با استفاده از تخمین‌گر کمترین مربعات بازگشتی ارائه شده است.

در ادامه به بررسی حساسیت کنترل‌کننده و تخمین‌گر طراحی شده می‌پردازیم. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی کارایی مناسبی دارد و کنترل‌کننده طراحی شده در حضور تأخیر متغیر با زمان نسبت به دامنه تأخیر، شکل تغییرات و نیز فرکانس منحنی تأخیر مقاوم است. کیفیت ردیابی سیگنال مرجع با تغییر ضرایب کنترل‌کننده‌ها قابل بهبود است. چنانچه پاسخ سریع‌تری برای خروجی مدنظر باشد، ضرایب کنترل‌کننده بزرگتر خواهد شد و چنانچه این موضوع امر مطلوبی نباشد، کاهش ضرایب مشکل را حل خواهد کرد.

در "شکل 9" توانایی کنترل‌کننده طراحی شده در حضور تخمین‌گر لیاپانوف در شناسایی تغییرات ناگهانی تأخیر و نیز نحوه ردیابی سیگنال مرجع ورودی در خروجی سیستم، مورد بررسی قرار گرفته است.



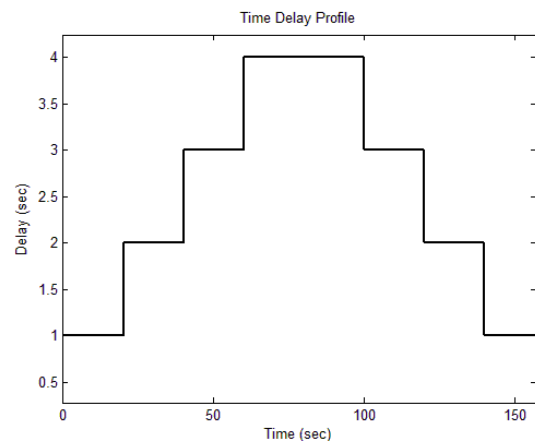
**Fig. 3** Satellite orientation control from ground stations  
شکل 3 کنترل وضعیت ماهواره از ایستگاه‌های زمینی

به ازای تأخیر ثابت  $\tau_0$  اندازه‌ی پاسخ فرکانسی سیستم با توجه به رابطه‌ی (34) تغییر می‌کند ولی فاز سیستم به شکل رابطه (35) در می‌آید که به این معناست که سیستم فاز منفی می‌یابد و شکل نمودار نایکوئیست دچار کشیدگی شده به سمت نقطه‌ی بحرانی حرکت می‌کند.

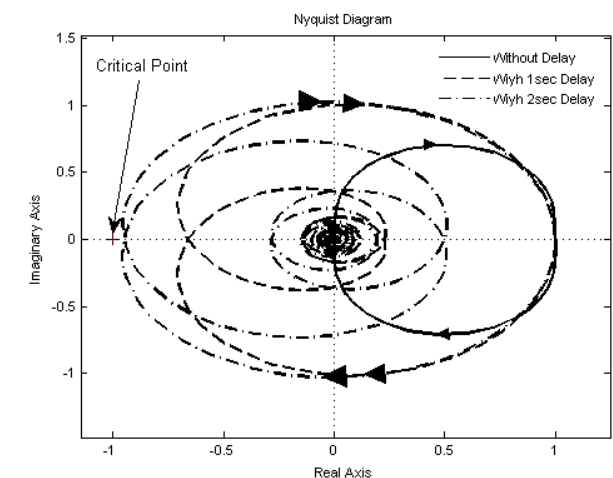
$$|G(j\omega_0)e^{-j\omega_0\tau}| = |G(j\omega_0)| \quad (34)$$

$$\angle G(j\omega_0)e^{-j\omega_0\tau} = \angle G(j\omega_0) - \omega_0\tau \quad (35)$$

برای پروفایل تأخیر متغیر با زمانی به "شکل 4"، نمودارهای نایکوئیست "شکل 5" و "شکل 6" به‌دست می‌آید.



**Fig. 4** Delay time variation form  
شکل 4 نمودار شکل تغییرات تأخیر



**Fig. 5** Nyquist diagram of system under 1 and 2 second delay  
شکل 5 نمودار نایکوئیست به ازای تأخیر 1 و 2 ثانیه

آنچه که از نتایج شبیه‌سازی‌ها در "شکل 11" تا "شکل 16" به دست می‌آید، پاسخ سیستم حلقه بسته با استفاده از تخمین‌گر لیاپانوف نسبت به کمترین مربعات بازگشتی به مراتب مناسب‌تر و در برابر انواع تغییرات مقاوم‌تر است. مسئله دیگری که لازم است مورد بررسی قرار گیرد، مقایسه رفتار سیستم حلقه بسته در حضور کنترل‌کننده تطبیقی با رویکرد مدل چندگانه که در این مقاله پیشنهاد گردید، نسبت به یک کنترل‌کننده انتگرالی-تناسبی معمولی است. در "شکل 17" رفتار سیستم در حالت نرمال مورد بررسی قرار گرفته است. در "شکل 18" رفتار سیستم حلقه بسته نسبت به افزایش فرکانس تأخیر، در "شکل 19" مقاوم بودن سیستم نسبت به افزایش دامنه تأخیر و در "شکل 20" حساسیت سیستم نسبت به افزایش فرکانس سیگنال ورودی شبیه‌سازی و مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، کنترل‌کننده جدید نسبت به یک کنترل‌کننده انتگرالی-تناسبی معمولی هم از نظر کیفیت پاسخ خروجی و ردیابی سیگنال مرجع ورودی و هم از نظر مقاوم بودن در برابر انواع تغییرات ارجحیت دارد. لازم به یادآوری است که این شبیه‌سازی‌ها در حضور تخمین‌گر لیاپانوف انجام شده است.

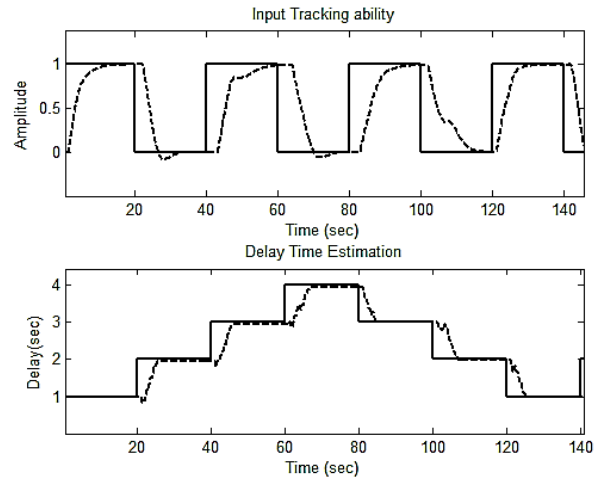


Fig. 7 Estimated delay time and input signal tracking with Liapunov estimation method

شکل 7 شکل موج تأخیر شناسایی شده و نحوه ردیابی سیگنال مرجع ورودی در خروجی سیستم حلقه بسته با روش تخمین لیاپانوف

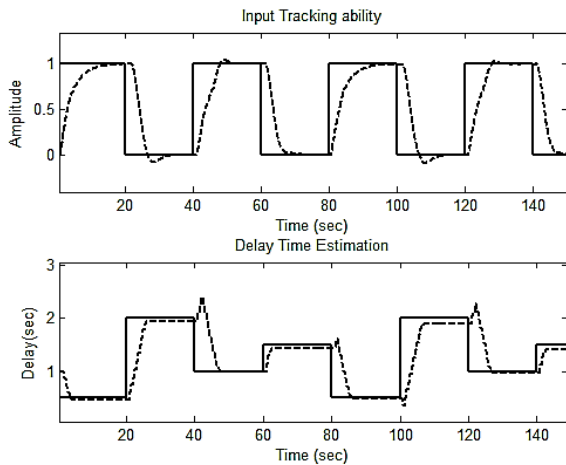


Fig. 9 Estimation of fast variation of delay time and input signal tracking with Lyapunov estimation method

شکل 9 نحوه تخمین تغییرات ناگهانی تأخیر و ردیابی سیگنال مرجع ورودی در خروجی سیستم حلقه بسته با روش لیاپانوف

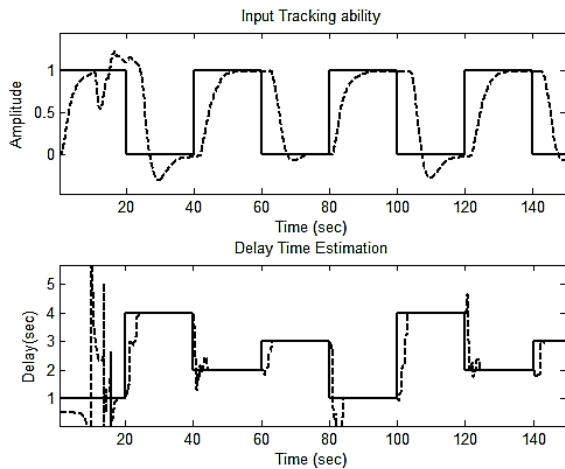


Fig. 10 Estimation of fast variation of delay time and input signal tracking with RLMS estimation method

شکل 10 نحوه تخمین تغییرات ناگهانی تأخیر و ردیابی سیگنال مرجع ورودی در خروجی سیستم حلقه بسته با روش کمترین مربعات بازگشتی

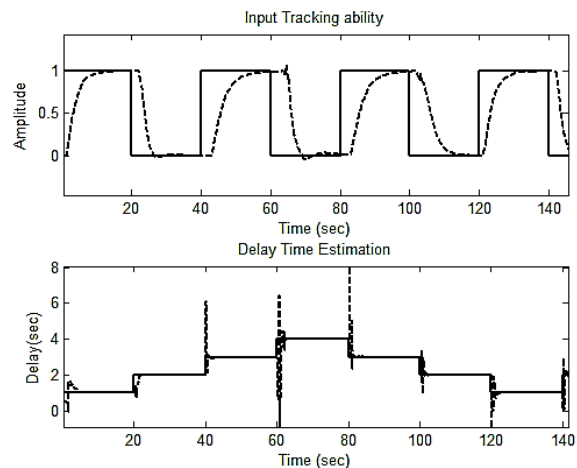


Fig. 8 Estimated delay time and input signal tracking with RLMS estimation method

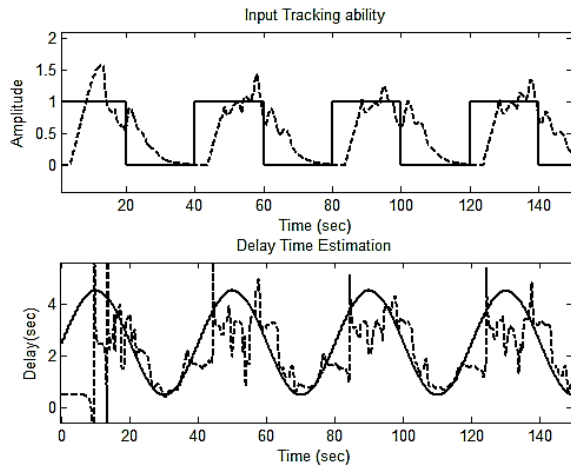
شکل 8 شکل موج تأخیر شناسایی شده و نحوه ردیابی سیگنال مرجع ورودی در خروجی سیستم حلقه بسته با روش تخمین کمترین مربعات بازگشتی

در "شکل 10" توانایی تخمین‌گر کمترین مربعات بازگشتی در شناسایی تغییرات ناگهانی تأخیر و نحوه ردیابی ورودی مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که دیده می‌شود، تخمین‌گر لیاپانوف دارای مقاومت بیشتری در برابر تغییرات تأخیر داشته و همچنین سیستم حلقه بسته با این تخمین‌گر سیگنال ورودی را با کیفیت مناسب ردیابی می‌کند.

در "شکل 11" و "شکل 12" مقاوم بودن سیستم حلقه بسته نسبت به تغییرات منحنی تغییرات تأخیر مورد بررسی قرار گرفته است. "شکل 11" پاسخ سیستم حلقه بسته در حضور تخمین‌گر لیاپانوف و "شکل 12" مربوطه به تخمین‌گر کمترین مربعات بازگشتی می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود، پاسخ سیستم با تخمین‌گر لیاپانوف به مراتب بهتر است.

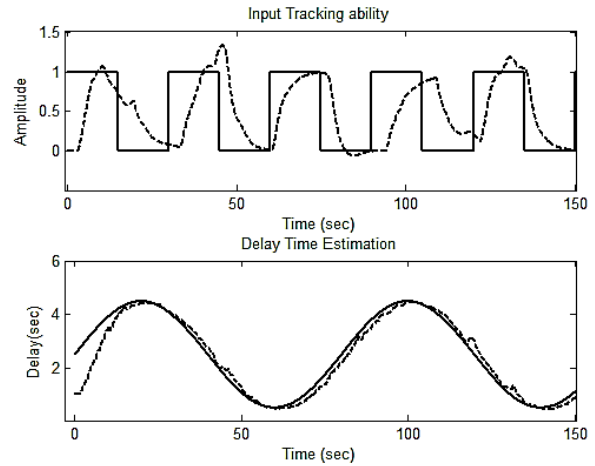
در "شکل 13" و "شکل 14" حساسیت سیستم حلقه بسته به افزایش فرکانس تغییرات تأخیر در حضور تخمین‌گرهای لیاپانوف و کمترین مربعات بازگشتی مورد بررسی قرار گرفته است. در "شکل 15" و "شکل 16" مقاومت سیستم حلقه بسته در برابر افزایش دامنه تأخیر مورد بررسی قرار گرفته است.





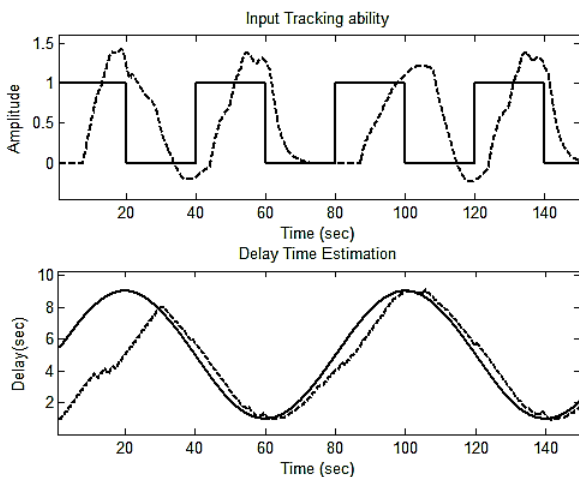
**Fig. 14** Sensitivity of closed loop system response to delay time frequency in the presence of Lyapunov estimator

شکل 14 حساسیت سیستم حلقه بسته نسبت به فرکانس تغییرات تأخیر در حضور تخمین گر لیپانوف



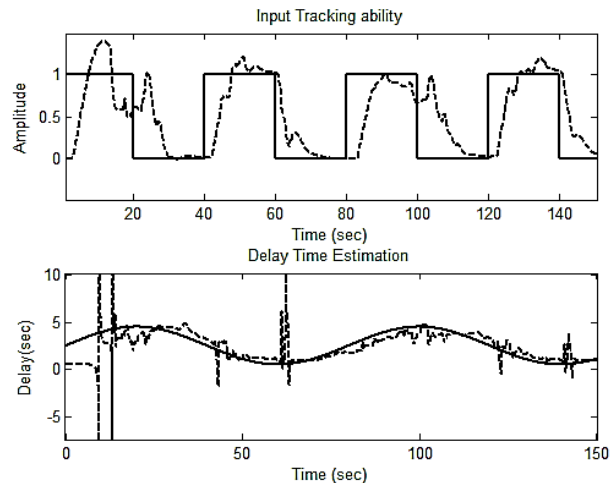
**Fig. 11** Closed loop system response to sine wave delay time in the presence of Lyapunov estimator

شکل 11 پاسخ سیستم حلقه بسته به منحنی تأخیر سینوسی در حضور تخمین گر لیپانوف



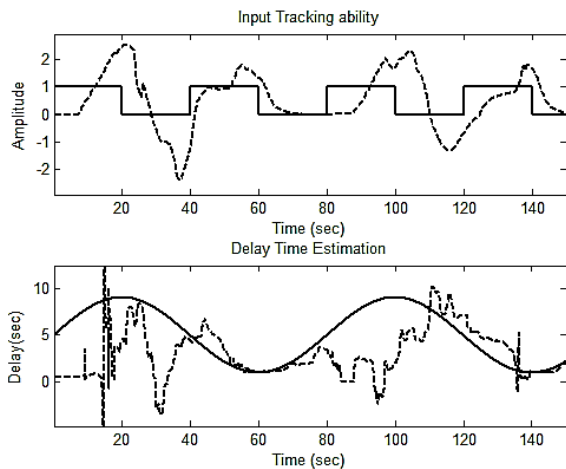
**Fig. 15** Robustness of closed loop system response to delay time frequency in the presence of Lyapunov estimator

شکل 15 مقاومت سیستم حلقه بسته در برابر افزایش دامنه تأخیر در حضور تخمین گر لیپانوف



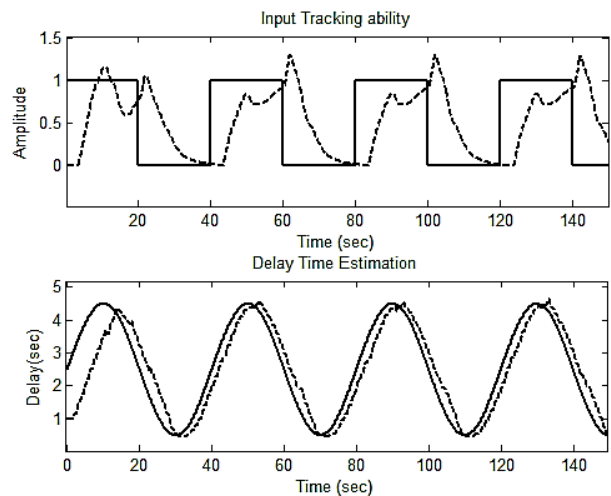
**Fig. 12** Closed loop system response to sine wave delay time in the presence of RLMS estimator

شکل 12 پاسخ سیستم حلقه بسته به منحنی تأخیر سینوسی در حضور تخمین گر RLMS



**Fig. 16** Robustness of closed loop system response to delay time frequency in the presence of RLMS estimator

شکل 16 مقاومت سیستم حلقه بسته در برابر افزایش دامنه تأخیر در حضور تخمین گر کمترین مربعات بازگشتی (RLMS)



**Fig. 13** Sensitivity of closed loop system response to delay time frequency in the presence of Lyapunov estimator

شکل 13 حساسیت سیستم حلقه بسته نسبت به فرکانس تغییرات تأخیر در حضور تخمین گر لیپانوف



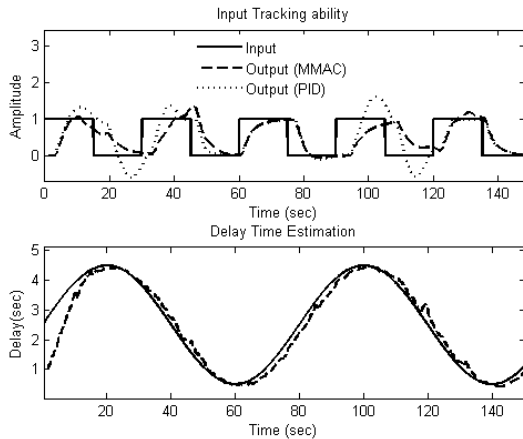


Fig. 20 Comparison of closed loop system behavior with input signal frequency change

شکل 20 مقایسه رفتار سیستم حلقه بسته با تغییر فرکانس سیگنال ورودی

با مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها می‌توان به این نتیجه رسید که کنترل کننده تطبیقی با رویکرد مدل چندگانه و با استفاده از ترکیب وزنی کنترل کننده‌ها، نسبت به کنترل کننده‌های معمولی و روش‌های تطبیقی قبلی از نظر کیفیت پاسخ خروجی و مقاومت در برابر انواع تغییرات نسبت به شرایط طراحی ارجحیت دارد. همچنین شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که پایداری سیستم حلقه بسته در حضور انواع تغییرات برقرار است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که الگوریتم تخمین با استفاده از روش لیاپانوف نسبت به روش تخمین‌گر کمترین مربعات بازگشتی مناسب‌تر است و در شرایط مختلف و نسبت به انواع تغییرات در منحنی تأخیر تخمین بهتر و نرم‌تری دارد.

### 5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل کننده مدل چندگانه تطبیقی برای کنترل موقعیت آنتن یک ماهواره با تأخیر متغیر با زمان در ورودی کنترل مورد توجه قرار داده شد. روش‌های تخمین مختلف برای تخمین تأخیر بکار گرفته شد و الگوریتمی مناسب برای تخمین باندهای تأخیر انتخاب گردید به گونه‌ای که پارامترهای آزاد موجود در الگوریتم، سرعت تخمین باندهای تأخیر را تنظیم کند. برای رسیدن به پاسخ مطلوب و گریز از ناپایداری، کنترل کننده‌های طراحی شده با قوانین سوئیچینگ در حلقه کنترلی به کار گرفته شد. برای کم شدن اثرات نامطلوب سوئیچینگ گسسته، یک مدل مناسب برای سوئیچینگ گسسته وزن‌دار از کارهای ارائه شده قبلی انتخاب گردید. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که الگوریتم تخمین لیاپانوف کارایی بهتری نسبت به روش تخمین‌گر کمترین مربعات بازگشتی دارد.

شبیه‌سازی‌های انجام گرفته بر روی مدل سیستم مورد نظر که یک سیستم خطی نامتغیر با زمان تحت تاثیر تأخیر متغیر با زمان در ورودی است، عملکرد مطلوب الگوریتم تخمین انتخاب شده و کنترل کننده طراحی شده را به خوبی نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌های متعدد در شرایط مختلف عملکردی سیستم نشان می‌دهد که سیستم حلقه بسته تحت شرایط مختلف پایدار است. نتایج بدست آمده در این مقاله را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ✓ تأخیر متغیر با زمان در ورودی سیستم نامتغیر با زمان، قابل تبدیل به مدلی مناسب برای به کارگیری الگوریتم کنترل تطبیقی مدل چندگانه می‌باشد.
- ✓ با استفاده از تخمین‌گر لیاپانوف نتایج بهتری نسبت به الگوریتم تخمین بازگشتی کمترین مربعات بدست می‌آید.

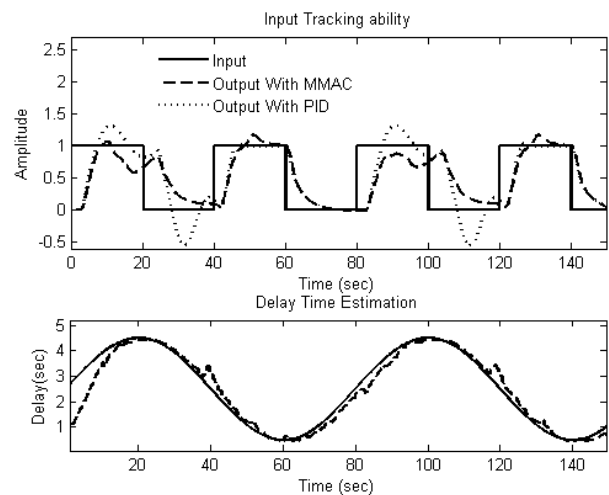


Fig. 17 Comparison of closed loop system behavior in the presence of MMAC and PID controller

شکل 17 مقایسه رفتار سیستم حلقه بسته با کنترل کننده MMAC و PID

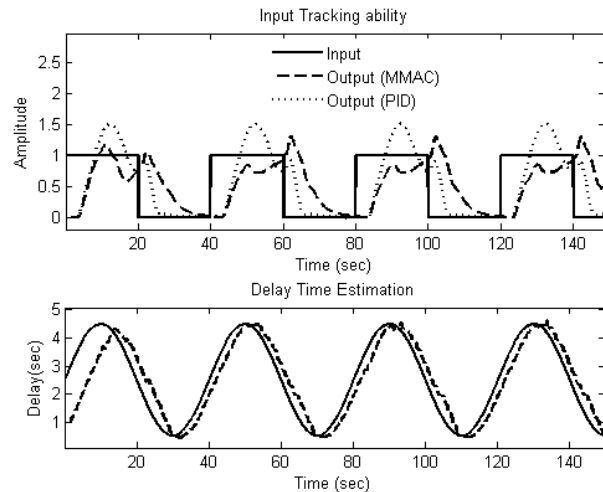


Fig. 18 Comparison of closed loop system behavior with delay time frequency change

شکل 18 مقایسه رفتار سیستم حلقه بسته با تغییر فرکانس تأخیر

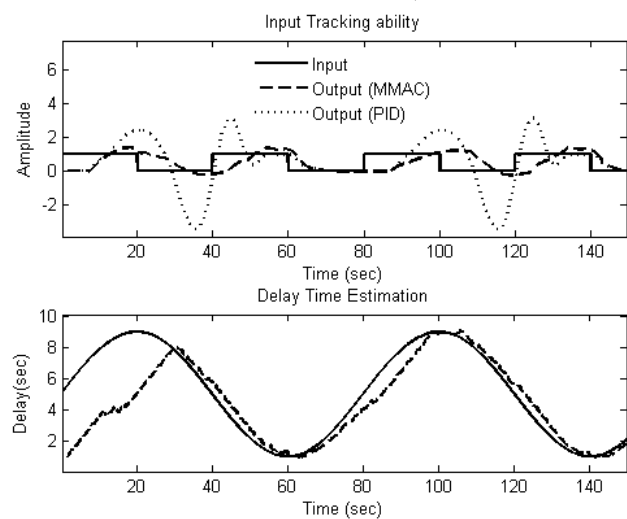


Fig. 19 Comparison of closed loop system behavior with delay time amplitude change

شکل 19 مقایسه رفتار سیستم حلقه بسته با افزایش دامنه تأخیر

- [17] S. R. Weller, G. C. Goodwin, Hysteresis switching adaptive control of linear multivariable systems, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 39, No. 7, pp. 1360–1375, 1994.
- [18] W. Zhang, Q. Li, Weighted multiple model adaptive control of time-varying systems, *Journal of Robotics, Networking and Artificial Life*, Vol. 1, No. 4, pp. 291–294 2015.
- [19] C. Tan, G. Tao, R. Qi, Direct adaptive multiple-model control schemes, *American Control Conference (ACC)*, Washington, DC, USA, pp. 4933–4939, June 17–19, 2013.
- [20] Y. Z. Gang, Q. J. lie, PID neural network adaptive predictive control for long time delay system, *International Conference in Information Computing and Application*, Part I: *Communications in Computer and Information Science*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 283–292, 2013
- [21] K. B. Blyuss, Y. N. Kyrychko, P. Hovel, E. Scholl, Control of unstable steady states in neutral time-delayed systems, *The European Physical Journal B*, Vol. 65, No. 4, pp. 571–576, 2008 .
- [22] C. L. Zhang, J. M. Li, Adaptive iterative learning control for nonlinear time-delay systems with periodic disturbances using FSE-neural network, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 8, No. 4, pp. 403–410, 2011.
- [23] J. H. Kim, Delay and its time-derivative dependent robust stability of time delayed linear systems with uncertainty, *IEEE Transaction On Automatic Control*, Vol. 46, No. 5, 2001.
- [24] F. El Haoussi, El H. Tissir, Delay and its time-derivative dependent robust stability of uncertain neutral systems with saturating actuators, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 7, No. 4, pp. 445–462, 2010.
- [25] S. Ahmed, B. Huang, S. L. Shah, Parameter and delay estimation of continuous-time models using a linear filter, *Journal of Process Control*, Vol. 16, No. 4, pp. 323–331, 2006.
- [26] X. Hong, Q. Zhu, An on-line algorithm of uncertain time delay estimation in a continuous system, *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Okayama, Japan, pp. 498–501, March 26–29, 2009.
- [27] A. B. Rad, W. L. Lo, K. M. Tsang, Simultaneous online identification of rational dynamics and time delay: A correlation-based approach, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 11, No. 6, pp. 957–959, 2003.
- [28] F. Gianni, C. Maffezzoni, R. Scattolini, Recursive estimation of time delay in sampled systems, *Automatica*, Vol. 27, No. 4, pp. 653–661, 1991.
- [29] M. A. Rami, M. Schönlein, J. Jordan, Estimation of linear positive systems with unknown time-varying delays, *European Journal of Control*, Vol. 19, pp. 179–187, 2013.
- [30] E. Hidayat, A. Medvedev, Laguerre domain identification of continuous linear time-delay systems from impulse response data, *Automatica*, Vol. 48, pp. 2902–2907, 2012.
- [31] S. Björklund, L. Ljung, An improved phase method for time-delay estimation, *Automatica*, Vol. 45, No. 10, pp. 2467–2470, 2009.
- [32] J. Roe, R. Gao, A. n O'Dwyer, Identification of a time-delayed process model using an overparameterisation method, *Proceedings of the China-Ireland International Conference on Information and Communications Technologies*, Dublin City University, Ireland, 28–29 August, 2007.
- [33] K. I. Taarit, L. Belkoura, M. Ksouri, J. P. Richard, A fast identification algorithm for systems with delayed inputs, *International Journal of Systems Science*, Vol. 42, No. 3, pp. 449–456, 2011.
- [34] G. C. Goodwin, K. S. Sin, *Adaptive Filtering, Prediction and Control*, pp. 49–71, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1984.
- [35] S. Obuz, J. R. Klotz, R. Kamalapurkar, W. Dixon, Unknown time-varying input delay compensation for uncertain, *Automatica*, Vol. 76, pp. 222–229, 2017.
- [36] A. A. Pyrkin, A. A. Bobtsov, S. V. Aranovskiy, S. A. Kolyubin, V. S. Gromov, Adaptive controller for linear plant with parametric uncertainties, input delay and unknown disturbance, *Preprints of the 19th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Cape Town, South Africa, pp. 11294–11298, August 24–29, 2014.
- [37] S. Shi, Y. Fang, A. J. Li, Adaptive robust control for uncertain nonlinear systems with time-varying delay, *8th IEEE International Conference on Control and Automation*, Xiamen, China, June 9–11, 2010.

✓ برای اجتناب از اثرات منفی سوئیچینگ گسسته، از ترکیب وزنی خروجی کنترل کننده‌ها استفاده شد. وزن سیگنال‌های کنترل با استفاده از خطای بین میانگین تأخیر هر باند و زمان تأخیر تخمین زده شده، استخراج شد.

✓ نتایج شبیه‌سازی روی سیستم مورد نظر نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی نسبت به کنترل کننده انگرالی-تناسبی، در حضور تغییرات دامنه تأخیر، شکل تغییرات و فرکانس تغییرات تأخیر حساسیت کمتری داشته و سیستم حلقه بسته با توجه به شبیه‌سازی‌های متعدد پایدار است.

## 6- مراجع

- [1] K. S. Narendra, C. Xiang, Adaptive control of discrete-time systems using multiple models, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 45, No. 9, pp. 1669–1686, 2000.
- [2] D. T. Magill, Optimal adaptive estimations of sampled stochastic processes, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. AC-10, pp. 434–439, 1965.
- [3] D. G. Lainiotis, Partitioning: A unifying framework for adaptive systems—I: Estimation, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 64, No. 8, pp. 1126–1143, Aug. 1976.
- [4] D. G. Lainiotis, Partitioning: A unifying framework for adaptive systems—II: Control, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 64, No. 8, pp. 1182–1197, Aug. 1976.
- [5] M. Athans, K. P. Dunn, C. S. Greene, W. H. Lee, et al., The stochastic control of the F-8c aircraft using a multiple model adaptive control (MMAC) method—Part I: Equilibrium flight, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. AC-22, pp. 768–780, 1977.
- [6] R. L. Moose, H. F. Vanlandingham, D. H. McCabe, Modeling and estimation for tracking maneuvering targets, *IEEE Transaction on Aerospace and Electrical System*, Vol. AES-15, pp. 448–456, 1979.
- [7] C. Yu, R. J. Roy, H. Kaufman, B. W. Bequette, Multiple-model adaptive predictive control of mean arterial pressure and cardiac output, *IEEE Transaction on Biomedical Engineering*, Vol. 39, pp. 765–778, 1992.
- [8] X. R. Li, Y. B. Shalom, Design of an interacting multiple model algorithm for air traffic control tracking, *IEEE Transaction on Control System Technology*, Vol. 1, pp. 186–194, 1993.
- [9] D. W. Lane, P. S. Maybeck, Multiple model adaptive estimation applied to the LAMBDA URV for failure detection and identification, *IEEE Conference on Decision Control*, Vol. 33, pp. 678–683, 1994.
- [10] T. Chai, L. Zhai, H. Yue, Multiple models and neural networks based decoupling control of ball mill coal-pulverizing systems, *Journal of Process Control*, Vol. 21, pp. 351–366, 2011.
- [11] R. Manikandan, R. Vinodha, Multiple model based adaptive control for shell and tube heat exchanger process, *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 11, No. 5, pp. 3175–3180, 2016.
- [12] B. Martensson, *Adaptive Stabilization*, Ph.D. Thesis, Lund Institute of Technology Lund, Sweden, 1986.
- [13] M. Fu, B. R. Barmish, Adaptive stabilization of linear systems via switching control, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. AC-31, No. 12, pp. 1097–1103, 1986.
- [14] A. T. Patel, S. K. Shah, H. A. Shah, Design and analysis of switched multiple model adaptive control for local controllers, *International Journal of Engineering Associates*, Vol. 1, Issue. 4, pp. 164–168, 2013.
- [15] R. H. Middleton, G. C. Goodwin, D. J. Hill, D. Q. Mayne, Design issues in adaptive control, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 33, No. 1, pp. 50–58, 1988.
- [16] A. S. Morse, D. Q. Mayne, G. C. Goodwin, Applications of hysteresis switching in parameter adaptive control, *IEEE Transaction Automatic Control*, Vol. 37, No. 9, pp. 1343–1354, 1992.