Archive of SID

JIPET

Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology
Vol. 12/ No. 47/ Autumn 2021
P-ISSN: 2322-3871, E-ISSN: 2345-5594, http://jipet.iaun.ac.ir/

Dynamical Analysis and Finite-Time Fast Synchronization of a Novel Autonomous Hyper-Chaotic System

Javad Mostafaee[1], *PhD Candidate*, Saleh Mobayen[2], *Associate Professor*, Behrouz Vaseghi[3], *Assistant Professor*, Mohammad Vahedi[1], *Assistant Professor*

[1]Department of Electrical Engineering- Saveh Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran.
javadmostafaee1982@gmail.com, vahedi@iau-saveh.ac.ir
[2]Department of Electrical Engineering- University of Zanjan, Zanjan, Iran.
mobayen@znu.ac.ir
[3]Department of Electrical Engineering- Abhar Branch, Islamic Azad University, Abhar, Iran.
behrouz.vaseghi@gmail.com

Abstract:
This paper constructs a new complex hyper-chaotic system with attractive coexisting dynamic behaviors. We analyze the hyper-chaotic attractors, equilibrium points, Poincaré maps, Kaplan-York dimension, and Lyapunov exponent behaviors. The characteristics of hyper-chaotic systems include higher complexity, higher parametric resistance and sensitivity to very small changes in initial conditions. We prove that the introduced hyper–chaotic system is much more complex than the similar hyper-chaotic systems, that can suitable for use in encryption and secure communication. Next, the work describes a fast terminal sliding mode controller scheme for the fast synchronization and stability of the new complex hyper–chaotic system. It is shown that by applying uncertainty to the system, both steps of the sliding mode control have finite-time convergence properties. Next, a comparison will be made between a newly designed controller and a similar. Finally, using the MATLAB simulation, the results are confirmed for the new system. The results shown that the new hyper-chaotic system with many adsorbents is much more complex than similar systems, and the proposed controller has a faster convergence response than the similar controller.

Keywords: new hyper-chaotic system, chaotic analysis, finite-time synchronization, fast terminal sliding mode control.

Received: 2 February 2021
Revised: 19 March 2021
Accepted: 25 March 2021

Corresponding Author: Dr. Saleh Mobayen

Citation: J. Mostafaee, S. Mobayen, B. Vaseghi, M. Vahedi, "Dynamical analysis and finite-time fast synchronization of a novel autonomous hyper-chaotic system", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 12, no. 47, pp. 73-94, December 2021 (in Persian).

www.SID.ir

Archive of SID

DOR: 20.1001.1.23223871.1400.12.3.6.6

مقاله پژوهشی

تجزیه و تحلیل دینامیکی و همزمان‌سازی زمان محدود سریع با استفاده از سیستم فوق آشوبی جدید خودگردان

جواد مصطفایی[1]، دانشجوی دکتری، صالح مبین[2]، دانشیار، بهروز واثقی[3]، استادیار، محمد واحدی[1]، استادیار

۱-دانشکده مهندسی برق- واحد ساوه، دانشگاه آزاد اسلامی، ساوه، ایران
javadmostafaee1982@gmail.com, vahedi@iau-saveh.ac.ir
۲-دانشکده مهندسی برق- دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
mobayen@znu.ac.ir
۳-دانشکده مهندسی برق- واحد ابهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ابهر، ایران
behrouz.vaseghi@gmail.com

چکیده: در این مقاله یک سیستم فوق آشوبی جدید پیچیده با رفتارهای جذاب معرفی خواهیم نمود. ما تجزیه‌وتحلیل‌های استاندارد سیستم‌های فوق آشوبی ازجمله نمودار دوشاخگی، نقاط تعادل، نقشه پوانکاره، بعد کاپلان-یورک و نماهای لیاپانوف را انجام خواهیم داد. از خصوصیات سیستم‌های فوق آشوبی می‌توان به پیچیدگی بالاتر، مقاومت پارامتری بیشتر و حساسیت به تغییرات بسیار کوچک در شرایط اولیه اشاره کرد. در ادامه ثابت خواهیم نمود که سیستم معرفی‌شده بسیار پیچیده‌تر از سیستم‌های فوق آشوبی مشابه است که می‌تواند برای استفاده در رمزگذاری و پنهان‌سازی داده‌ها بسیار ارزشمند باشد. در مرحله بعدی، یک کنترل‌کننده مودلغزشی سریع برای همزمان‌سازی زمان محدود سیستم فوق آشوبی معرفی خواهیم نمود و پایداری کنترل‌کننده جدید را ثابت خواهیم کرد. نشان خواهیم داد با اعمال اغتشاش و نامعینی به سیستم، هر دو مرحله کنترل مودلغزشی دارای ویژگی‌های همگرایی زمان محدود هستند. سرانجام، مقایسه‌ای بین کنترل‌کننده جدید طراحی‌شده با کنترل‌کننده مشابه ازلحاظ زمان همگرایی انجام خواهد شد. در پایان، نتایج با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و اثبات‌شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد سیستم فوق آشوبی جدید با جاذب‌های فراوان بسیار پیچیده‌تر از سیستم‌های مشابه بوده و کنترل‌کننده پیشنهادی نیز پاسخ همگرایی سریع‌تری را نسبت به کنترل‌کننده مشابه، دارا است.

کلمات کلیدی: سیستم فوق آشوبی جدید، تجزیه‌وتحلیل آشوبی، همزمان‌سازی زمان محدود، کنترل مودلغزشی سریع.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۴
تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱/۵

نویسنده مسئول: دکتر صالح مبین
نشانی نویسنده مسئول: زنجان- بلوار دانشگاه- دانشگاه زنجان- دانشکده مهندسی- گروه برق

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

در دنیای امروز فناوری‌های ارتباطی از نیازهای اساسی انسان بوده و تصاویر به‌عنوان یکی از حامل‌های مهم اطلاعات هستند که نقش اساسی در حوزه‌های فن‌اوری‌های ارتباطی دارند. یکی از مشکلاتی که در این حوزه وجود دارد، امنیت در شبکه‌های انتقال اطلاعات است. در حال حاضر انتقال اطلاعات در بسیاری از کاربردها به‌صورت معمول و از طریق اینترنت انجام می‌شود که می‌تواند امنیت انتقال اطلاعات را به خطر اندازد. انتقال اطلاعات در شبکه‌های معمول ازجمله اینترنت خطراتی ازجمله دسترسی آسان به اطلاعات را به همراه خواهد داشت که می‌تواند امنیت اطلاعات را به خطر بیاندازد [۱،۲]. یکی از راه‌های افزایش امنیت در انتقال اطلاعات، رمزنگاری اطلاعات و تصاویر با استفاده از توابع آشوبی است [۳]. سیستم‌های آشوبی دارای تعدادی خصوصیات ذاتی ازجمله پیچیدگی و نوسانات بالا، عدم قطعیت پارامتری و حساسیت شدید به تغییرات بسیار کوچک در شرایط اولیه هستند [۴]. با توجه به غیرقابل پیش‌بینی بودن رفتار سیستم‌های آشوبی، از این ویژگی بسیار مهم می‌توان در بسیاری از زمینه‌ها مانند رمزنگاری [۵]، رباتیک [۶]، شبکه‌های بیولوژیکی [۷]، ارتباطات امن [۸]، پردازش اطلاعات [۹]، علوم پزشکی [۱۰]، هوافضا [۱۱]، فیزیک [۱۲] و سایر حوزه‌ها استفاده نمود. در سال‌های اخیر سیستم‌های آشوبی زیادی معرفی‌شده‌اند که این سیستم‌ها به دلیل وجود تنها یک نمای لیاپانوف مثبت[۱] در مقایسه با سیستم‌های فوق آشوبی با دو یا بیشتر نمای لیاپانوف، از امنیت کمتری برخوردار هستند [۱۳،۱۴]. طبق تحقیقات انجام‌شده در این زمینه، محققان دریافتند که هرچه سیستم پیچیده‌تر و دارای ابعاد بزرگ‌تری باشد، امنیت آن در انتقال اطلاعات امن آشوبی نیز بیشتر خواهد بود[۱۵]. دو دلیل برای این موضوع مطرح‌شده است که اولاً سیستم با ابعاد کم، پهنای باند کمتری دارد و با فیلتر می‌توان اطلاعات رمزنگاری‌شده را بازیابی نمود و ثانیاً هر چه سیستم مرتبه بالاتر باشد دینامیک آن غیرخطی‌تر و پیچیده‌تر خواهد بود. اولین سیستم فوق آشوبی در سال ۱۹۷۹ توسط راسلر با دو نمای لیاپانوف مثبت، معرفی شد [۱۶]. طراحی سیستم‌های آشوبی و فوق آشوبی همراه با تجزیه‌وتحلیل خصوصیات ذاتی آن‌ها و تجزیه‌وتحلیل پایداری این سیستم‌ها ازجمله مطالعاتی است که در سال‌های اخیر در این زمینه انجام‌شده است. به‌طور مثال در مرجع [۱۷]، یک سیستم فوق آشوبی ۴ بعدی با نوسانات بالا معرفی‌شده و در ادامه جذابیت‌های سیستم با توجه به تغییر در نقاط تعادل، مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته است. ثابت‌شده که هرچه سیستم نسبت به تغییر در شرایط اولیه حساسیت بیشتری نشان دهد، نوسانی‌تر خواهد بود. در مرجع [۱۸]، یک سیستم فوق آشوبی به‌منظور همزمان‌سازی و انتقال اطلاعات امن طراحی‌شده است. نماهای لیاپانوف سیستم با تغییر پارامترها ارزیابی‌شده و همگرایی نمایی سیستم با استفاده از نماهای لیاپانوف نشان داده‌شده است. ثابت‌شده هر چه سیستم فوق آشوبی دارای تعداد نماهای لیاپانوف مثبت بیشتر باشد، فوق آشوبی‌تر خواهد بود. در مرجع [۱۹]، با گسترش سیستم لورنز یک سیستم فوق آشوبی جذاب طراحی‌شده و تمام جاذب‌های پنهان سیستم مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته و حالت‌های مختلف برای نمودار دوشاخگی[۲] و طیف لیاپانوف[۳] رسم شده است. یکی از ویژگی‌های این سیستم جدید، همزیستی جاذب‌های آن است.

در سال‌های اخیر سیستم‌های فوق آشوبی زیادی با استفاده از توابع مختلف ازجمله توابع نمایی، تابع علامت، توابع مثلثاتی و توابع هذلولی ساخته‌شده‌اند [۲۰-۲۲]. ویژگی‌های مشترک همه این سیستم‌ها در مقایسه با سیستم‌های فوق آشوبی معمولی، نوسان بیشتر آن‌ها و حساسیت آن‌ها به شرایط اولیه است. رمزگشایی برای گیرنده غیرمجاز بدون دانستن شرایط اولیه و پارامترهای سیستم کار سخت و دشواری است. یکی از راه‌های افزایش امنیت در ارتباطات آشوبی، استفاده از سیستم‌های فوق آشوبی پیچیده است. بنابراین، هرچه ساختار سیستم پیچیده‌تر و تعداد پارامترهای آن بیشتر باشد، رمزگشایی آن دشوارتر خواهد بود. بر این اساس در این مقاله یک سیستم فوق آشوبی بسیار پیچیده برای افزایش امنیت در شبکه‌های انتقال اطلاعات استفاده خواهیم نمود.

در یک سیستم ارتباطی امن آشوبی، برای اطمینان از انتقال امن اطلاعات، باید از سیستم‌های مشابهی در گیرنده و فرستنده ایجادشده و برای داشتن یک انتقال کامل و موفق، سیستم‌های آشوبی گیرنده و فرستنده باید همزمان شوند. همزمان‌سازی سیستم‌های آشوبی و فوق آشوبی یکی از رویکردهای کنترل است که سال‌هاست موردتوجه محققان قرارگرفته است. برای این منظور از یک تکنیک کنترل مناسب برای انتقال سیستم‌های گیرنده و فرستنده استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، از روش‌ها و کنترل‌کننده‌های مختلفی برای همزمان‌سازی سیستم‌های آشوبی استفاده‌شده است ازجمله کنترل فیدبک خروجی[۴] [۲۳]،

www.SID.ir

کنترل تطبیقی[۵] [۲۴]، کنترل غیرفعال[۶] [۲۵]، کنترل بهینه[۷] [۲۶]، کنترل متناسب-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر[۸] (PID) [۲۷]، کنترل برگشتی تطبیقی[۹] [۲۸]، کنترل خطی[۱۰] [۲۹]، شبکه عصبی[۱۱] [۳۰]، کنترل پیش‌بین[۱۲] [۳۱]، کنترل اتفاقی[۱۳] [۳۲]، کنترل بازگشت به عقب[۱۴] [۳۳]، کنترل مودلغزشی[۱۵] [۳۴] و کنترل مودلغزشی ترمینال[۱۶] [۳۵].

ازآنجاکه زمان نقش اساسی در انتقال اطلاعات دارد، اطمینان از انتقال اطلاعات در سریع‌ترین زمان ممکن بسیار مهم است. در میان روش‌های موجود، کنترل مودلغزشی دارای ویژگی‌های خاصی ازجمله مقاومت در برابر عدم قطعیت پارامتری، طراحی ساده، پاسخ گذرای مناسب، کاهش حساسیت به نامعینی‌های محدود و سادگی اجرا است [۳۶]. اگرچه این کنترل‌کننده بسیار محبوب و کارآمد است، اما این روش یک اشکال اساسی به نام پدیده وزوز[۱۷] دارد. پدیده وزوز در عمل، یک پدیده بسیار نامطلوب است زیرا می‌تواند باعث افزایش مصرف انرژی، استهلاک مکانیکی در سیستم‌ها و محرک‌ها شده و عملکرد کنترل‌کننده را با اختلال مواجه نماید. تحقیقات زیادی برای حل مشکلات کنترل‌کننده مودلغزشی انجام‌شده است، در مرجع [۳۷] برای از بین-بردن پدیده وزوز و دست‌یابی به عملکرد بالا در حضور اغتشاشات و نامعینی‌ها، یک کنترل جدید با ترکیب کنترل‌کننده PID و کنترل‌کننده مودلغزشی معرفی‌شده است. در مرجع [۳۸]، از یک کنترل‌کننده مودلغزشی قوی و بدون چترینگ برای کنترل و ردیابی یک وسیله نقلیه از راه دور با سه درجه آزادی با حضور عدم قطعیت در سیستم استفاده شده است. کنترل‌کننده جدید توانسته در حضور عدم قطعیت و نامعینی، ضمن حفظ پایداری و ردیابی دقیق، وزوز را تا حد امکان کاهش دهد.

در سال‌های اخیر کنترل‌کننده‌های قدرتمند جدیدی با توانایی محدود کردن زمان و از بین بردن اثرات مخرب بر روی سیستم‌ها و محرک‌ها به نام کنترل مودلغزشی ترمینال معرفی‌شده‌اند. در مقایسه با کنترل‌کننده مودلغزشی معمولی، این کنترل‌کننده یک ترم غیرخطی در عملکرد سطح لغزش برای بهبود و اطمینان از همگرایی حالت‌های سیستم به یک مسیر مشخص در زمان محدود ارائه می‌دهد. ازجمله مزایای این کنترل‌کننده می‌توان به پاسخ دینامیکی سریع، همگرایی زمان محدود و دقت ردیابی بالا اشاره کرد [۳۹]. بر این اساس، در این مقاله از یک کنترل‌کننده مودلغزشی ترمینال به‌منظور همزمان‌سازی و انتقال اطلاعات در سریع‌ترین زمان استفاده خواهیم نمود. نوآوری های این مقاله شامل موارد زیر هستند:

- طراحی و ساخت یک سیستم فوق آشوبی ۴ بعدی جدید پیچیده به‌منظور افزایش امنیت در انتقال اطلاعات.
- ساخت یک کنترل‌کننده جدید مودلغزشی ترمینال و اثبات پایداری کنترل‌کننده با استفاده از تابع لیاپانوف.
- تکنیک همزمان‌سازی آشوبی با واردکردن عدم قطعیت در سیستم برای انتقال اطلاعات امن در سریع‌ترین زمان ممکن.

سایر بخش‌های این مقاله به شرح زیر است: در بخش ۲ مدل دینامیکی سیستم فوق آشوبی پیچیده و مزایا و ویژگی‌های آن را ارائه خواهیم داد. در بخش ۳ خصوصیات اساسی و رفتارهای پویا سیستم فوق آشوبی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار خواهند گرفت. بخش ۴ مسئله همزمان‌سازی زمان محدود سیستم فوق آشوبی فرموله شده و کنترل‌کننده مودلغزشی ترمینال برای همزمان‌سازی زمان محدود طراحی و اثبات خواهد شد. در بخش ۵، مسائل مربوط به همزمان‌سازی و مقایسه کنترل‌کننده و شبیه‌سازی‌های عددی برای تأیید روش‌ها انجام خواهد شد. سرانجام، در بخش ۶ نتیجه‌گیری از بخش‌های قبلی را ارائه خواهیم داد.

۲- مدل سیستم فوق آشوبی ۴ بعدی جدید پیچیده

مدل دینامیکی سیستم فوق آشوبی جدید طراحی‌شده به شرح زیر است:

$$\begin{aligned}
dx_1(\tau)/d\tau &= a_1(x_2 - x_1) - a_2x_4 - a_3x_3^2 - a_4x_2x_3 + a_4f_1(x_{1,2,3,4})\\
dx_2(\tau)/d\tau &= a_5x_2 + a_6x_4 - a_1x_1^2 - a_7x_2x_3 - a_8x_1x_2 - x_1x_2x_3 - a_9f_2(x_3)\\
dx_3(\tau)/d\tau &= -a_2x_3 + a_{10}x_1^2 + x_1x_2x_3 - a_1f_3(x_{1,2,4})\\
dx_4(\tau)/d\tau &= -a_{11}x_1 + a_9x_3 + a_7x_1x_2x_3 + a_8x_1x_2 + a_{10}x_2x_3x_4 + a_{12}x_1x_3x_4 + a_{12}f_4(x_{1,2,3,4})
\end{aligned} \tag{1}$$

که در آن:

$$\begin{aligned}
f_1(x_{1,2,3,4}) &= \tanh(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)\\
f_2(x_3) &= e^{x_3}\\
f_3(x_{1,2,4}) &= e^{(x_1+x_2+x_4)}\\
f_4(x_{1,2,3,4}) &= e^{(x_1+x_2+x_3+x_4)}
\end{aligned} \tag{2}$$

Archive of SID

و x_i برای i برابر ۱ الی ۴ حالت‌های سیستم و a_i برای i برابر ۱ الی ۱۲ پارامترهای مثبت سیستم (۱) هستند و برابرند با:

$$\begin{aligned} &a_1 = 15.5,\ a_2 = 3.85,\ a_3 = 16.9,\ a_4 = 8.2,\ a_5 = 0.255,\ a_6 = 23.45, \\ &a_7 = 10.629,\ a_8 = 3.85,\ a_9 = 7.799,\ a_{10} = 5.5,\ a_{11} = 13.2,\ a_{12} = 19.5, \end{aligned} \tag{۳}$$

و شرایط اولیه سیستم برابر است با:

$$x_1(\tau_0) = -4.23,\ x_2(\tau_0) = -73.75,\ x_3(\tau_0) = 1.57,\ x_4(\tau_0) = 2.64 \tag{۴}$$

سیستم (۱) با شرایط و معادلات بیان‌شده رفتار فوق آشوبی خواهد داشت. یکی از الزامات سیستم‌های فوق آشوبی این است که باید حداقل چهار بعد و یک اصطلاح غیرخطی داشته باشند تا بتوانند رفتار فوق آشوبی داشته باشند و افزایش این پارامترها سیستم را پیچیده‌تر می‌کند[۳۹]. جدول (۱) توپولوژی سیستم فوق آشوبی طراحی‌شده را در مقایسه با سیستم‌های مشابه ارائه می‌دهد.

Table (1): The topology of a designed hyper-chaotic system compared to similar systems

جدول (۱): توپولوژی سیستم فوق آشوبی طراحی‌شده در مقایسه با سیستم‌های مشابه

نوع سیستم	تعداد کل ترم‌ها	تعداد کل پارامترها	تعداد پارامترهای غیرخطی	تعداد توابع خاص	مرجع
سیستم فوق آشوبی ممرستیو جدید	۸	۵	۳	۱	۲۰۱۹، [۴۰]
سیستم چندوجهی فوق آشوبی جدید	۱۰	۴	۵	۲	۲۰۱۸، [۴۱]
سیستم فوق آشوبی ممرستیو جدید	۱۲	۲	۳	۳	۲۰۱۹، [۴۲]
سیستم فوق آشوبی جدید	۹	۲	۴	۲	۲۰۱۲، [۴۳]
سیستم فوق سریع جدید	۸	۶	۱	۱	۲۰۱۹، [۴۴]
سیستم فوق سریع ممرستیو جدید	۱۰	۷	۲	۲	۲۰۱۹، [۴۵]
سیستم فوق آشوبی جدید	۹	۴	۳	۳	۲۰۱۶، [۴۶]
سیستم فوق آشوبی جدید	۱۳	۳	۹	۹	۲۰۱۹، [۴۷]
سیستم فوق آشوبی خودگردان جدید	۹	۴	۱	۱	۲۰۱۹، [۴۸]
سیستم فوق آشوبی جدید پیچیده	۲۴	۱۲	۱۶	۷	سیستم (۱)

همان‌طور که مشخص است، سیستم فوق آشوبی جدید نسبت به سایر سیستم‌های مشابه تعداد معادلات، توابع غیرخطی و توابع خاص بیشتری دارد. منظور از توابع خاص توابع مثلثاتی، توابع هذلولی[۱۸] و تابع نمایی[۱۹] است.

۳- خصوصیات اساسی و رفتارهای پویا سیستم فوق آشوبی

در این بخش خصوصیات طبیعی سیستم فوق آشوبی جدید مانند جاذب‌های آشوبی[۲۰]، طیف فرکانس[۲۱]، نقاط تعادل[۲۲]، نماهای لیاپانوف، بعدکاپلن-یورک[۲۳]، مقادیر ویژه[۲۴]، نقشه پوانکاره و نمودار دوشاخگی ارائه می‌شود.

۳-۱- تجزیه‌وتحلیل نقاط تعادل و مقادیر ویژه

یکی از پارامترهای مهم در مطالعه سیستم‌های دینامیکی، نقاط تعادل سیستم است. تجزیه‌وتحلیل این نقاط برای انتخاب شرایط اولیه سیستم فوق آشوبی، ضروری است [۴۹]. با تنظیم معادلات دیفرانسیل (۱) به صفر خواهیم داشت:

$$Q^* = [-0.7102,\ -19.1191,\ 5.2011,\ 21.0658] \tag{۵}$$

هنگامی‌که مقادیر پارامتر به‌صورت (۳) در نظر گرفته شوند، ماتریس خطی‌سازی سیستم در نقطه تعادل (۵) برابر است با:

$$J = \frac{\partial F_i}{\partial x_j}(x)\bigg|_{Q^*} = \begin{pmatrix} -7 & -19 & -11 & 4 \\ 195 & -49 & -1226 & 4 \\ -138 & -34 & 13 & 23 \\ 13178 & 12746 & 9831 & 11567 \end{pmatrix} \tag{۶}$$

مطابق با معادله (۶)، مقادیر ویژه سیستم به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

www.SID.ir

$$
\begin{aligned}
&[\Delta(s)=s^4+A_1s^3+A_2s^2+A_3s+A_4]\\
&A_1=(a_1+a_2-a_5-a_{12})\\
&A_2=(-a_6a_{12}-a_1a_5+a_1a_2-a_2a_5-a_1a_{12}+a_5a_{12}-a_2a_{12}+a_2a_5a_{12})\\
&A_3=(-a_1a_6a_{12}-a_2a_6a_{12}-a_1a_2a_5+a_1a_5a_{12}-a_1a_2a_{12})\\
&A_4=(a_1a_2a_6a_{12}+a_1a_2a_5a_{12}-a_1a_2a_9a_{11}+a_1a_2a_9a_{12}-a_1^2a_9a_{11}+a_1^2a_9a_{12})
\end{aligned}
\tag{۷}
$$

بنابراین مقادیر ویژه سیستم برابرند با:

$$s_1=-149,\ s_2=11558,\ s_{3,4}=56\pm j120 \tag{۸}$$

بنابراین نقطه تعادل (۵) یک نقطه تعادل زینی ناپایدار است. جدول (۲) شرایط پایداری سیستم را به ازای تغییرات در پارامتر a_4 را نشان می‌دهد.

Table (2): Investigating the stability of equilibrium points of the hyper-chaotic system with changes in the fourth parameter

جدول (۲): بررسی پایداری نقاط تعادل سیستم فوق آشوبی با تغییرات پارامتر چهارم

پارامتر a_4	مقادیر ویژه	نقاط تعادل	پایداری
۱۵/۶	(-۸۸ -۵۴ ۱-j۲۴ ۱+j۲۴)	(-۰/۶۱۷۵ -۵/۲۱۴۲ ۳/۰۸۲۵ ۶/۸۵۰۷)	ناپایدار
۱۵/۷	(۸۳۶ -۶۵ ۳-j۳۶ ۳+j۳۶)	(-۱/۴۹ -۴/۹۱۲ ۳/۴۷۹۴ ۶/۸۵۰۷)	ناپایدار
۱۵/۹	(-۸۵ -۵۰ -j۲۳ j۲۳)	(-۰/۶۳۳۶ -۵/۰۲۵۵ ۳/۰۳۳۴ ۱/۲۵۱۹)	طبیعی
۱۵/۹۵	(۷۹۰ -۸۵ ۱-j۳۲ ۱+j۳۲)	(-۱/۵۳۹۷ -۴/۶۹۷۴ ۳/۴۱۴۴ ۶/۶۹۸۵)	ناپایدار
۱۶/۱	(-۸۳ -۴۷ -j۲۳ j۲۳)	(-۰/۶۴۴۶ -۴/۹۰۱۸ ۳/۰۰۰۳ ۱/۲۶۷)	طبیعی
۱۶/۴	(۷۲۲ -۴۷ -j۲۳ j۲۳)	(-۱/۶۵۹۷ -۴/۲۹۶۵ ۳/۲۷۷۷۷ ۶/۴۶۹۸)	ناپایدار
۱۶/۴۵	(-۷۹ -۴۲ -۱-j۱۶ -۱+j۱۹)	(-۰/۶۶۷۵ -۴/۶۵۷۲ ۲/۹۴۱۲ ۱/۲۹۴۳)	پایدار
۱۶/۵	(-۷۹ -۴۱ -j۲۰ j۲۰)	(-۰/۶۶۷۵ -۴/۶۵۷۲ ۲/۹۳۲۶ -۱/۲۹۸۳)	طبیعی
۱۶/۶	(۷۰۰ -۴۰ -۱-j۱۹ -۱+j۱۹)	(-۱/۷۴۹۹ -۴/۰۸۶۸ ۳/۱۹۳۳ ۶/۴۰۵۷)	ناپایدار
۱۶/۶۵	(-۷۵ -۴۰ -۱-j۱۹ -۱+j۱۹)	(-۶/۷۶۵۹ -۴/۵۶۵۶ ۲/۹۰۶۴ ۱/۳۱۰۶)	پایدار

نتایج نشان می‌دهد که این سیستم با تغییرات بسیار کم در شرایط اولیه، رفتار کاملاً متفاوتی خواهد داشت. به‌طور مثال a_4 برابر ۱۶/۶، ۱۶/۵ و ۱۶/۴۵ سیستم فوق آشوبی به ترتیب پایدار، طبیعی و ناپایدار خواهد شد.

۳-۲- تجزیه‌وتحلیل جاذب آشوبی و طیف فرکانسی

واگرایی[۲۶] سیستم فوق آشوبی (۱) به‌صورت زیر است:

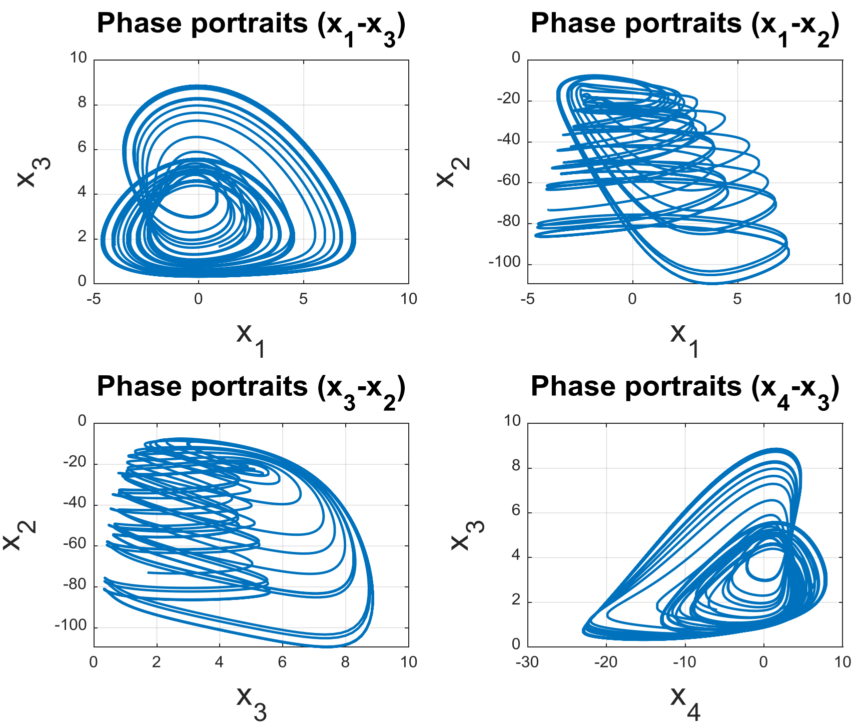
$$\nabla V=\sum_{i=1}^{4}\frac{\partial \dot{x}_i}{\partial x_i}=-a_1+a_5-a_9-a_2+a_{12}=15.5+0.255-8-4+19.75=23.505>0 \tag{۹}$$

بنابراین، سرعت همگرایی سیستم فوق آشوبی به سمت جاذبه‌های آن برابر است با:

$$e^{-(-a_1+a_5-a_9-a_2+a_{12})\tau} \tag{۱۰}$$

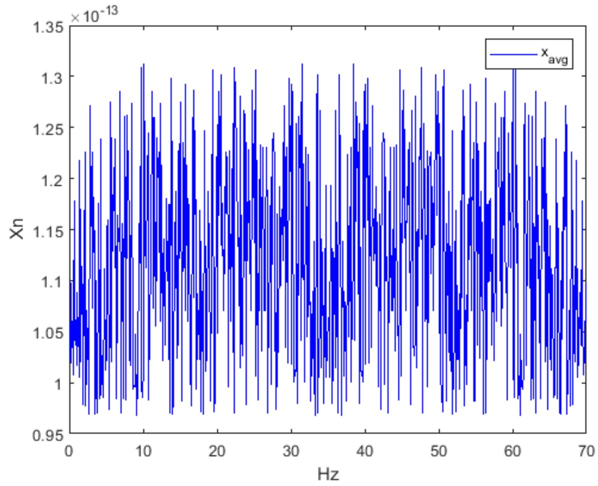
بنابراین، هرچه زمان به سمت بی‌نهایت می‌رود، سیستم فوق آشوبی (۱) محدودتر شده و بر روی یک جاذب، مستقر می‌شود [۵۰]. در شکل (۱) نمودارهای صفحه فاز سیستم فوق آشوبی (۱) نشان داده‌شده است. شاخص دیگر برای تأیید رفتار آشوبی سیستم‌ها، نوسانات طیف فرکانس بالای آن‌ها است. شکل (۲) طیف فرکانسی سیستم فوق آشوبی جدید را نمایش می‌دهد. هرچه نوسانات فرکانس بالا بیشتر باشد، پیچیدگی و سرعت سیگنال نیز بیشتر خواهد بود.

Archive of SID



شکل (۱): نمودار صفحه فاز سیستم فوق آشوبی جدید (۱)

Figure (1): Phase portraits diagram of a new hyper-chaotic system



شکل (۲): طیف فرکانسی سیستم فوق آشوبی جدید (۱)

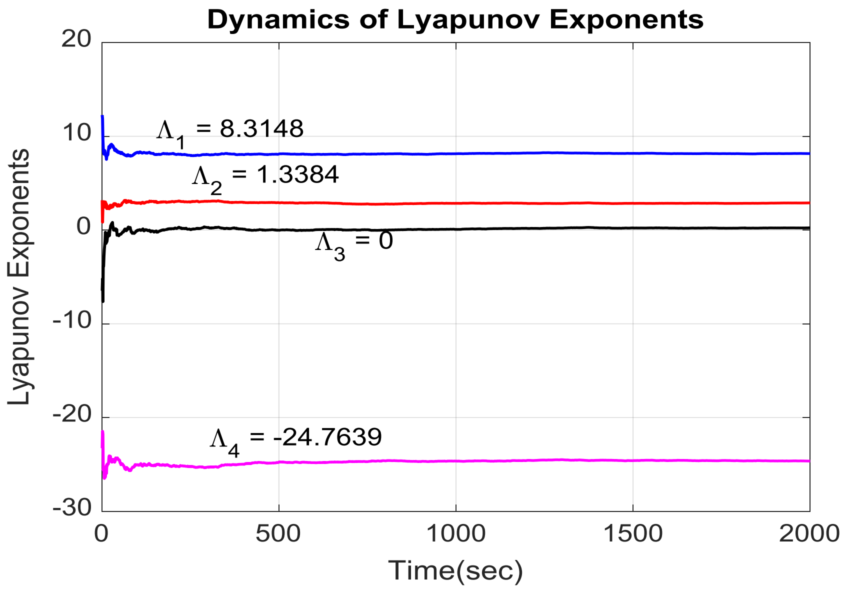
Figure (2): Frequency spectrum of the new hyper-chaotic system

۳-۳- بعد کاپلن-یورک و نمای لیاپانوف

واگرایی و همگرایی حالت‌های یک سیستم غیرخطی، با نمایش نماهای لیاپانوف آن‌ها تعیین می‌شود. در صورت مثبت بودن نماهای لیاپانوف، سیستم رفتار آشوبی خواهد داشت و اگر سیستم دو یا چند نمای لیاپانوف داشته باشد، فوق آشوبی خواهد بود. نماهای لیاپانوف سیستم فوق آشوبی جدید با شرایط اولیه (۴) در شکل (۳) نمایش داده‌شده‌اند و ازنظر عددی برابرند با:

$$\Lambda_1 = 8.3148,\ \Lambda_2 = 1.3384,\ \Lambda_3 = 0,\ \Lambda_4 = -24.7639 \qquad (۱۱)$$

www.SID.ir



شکل (۳): نماهای لیاپانوف سیستم فوق آشوبی جدید (۱)
Figure (3): Dynamics of Lyapunov of the novel hyper-chaotic system

با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای نماهای لیاپانوف، بعد کاپلن-یورک سیستم فوق آشوبی طراحی‌شده جدید به‌صورت زیر تعریف‌شده و به دست می‌آید [۵۱]:

$$D_{KY} = \iota + \frac{\sum_{\iota=1}^{\iota} \Lambda_\iota}{|\Lambda_{\iota+1}|} = 3 + \frac{\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3}{|\Lambda_4|} = 3.4494 \qquad (۱۲)$$

$$\text{for}: \ \Lambda_{1,2} > 0 \ , \ \Lambda_3 = 0, \ \Lambda_4 < 0$$

جدول (۳) بعد کاپلن-یورک سیستم فوق آشوبی جدید را ازنظر عددی، با تعدادی از سیستم‌های فوق آشوبی ۴ بعدی مشابه (دستگاه‌هایی که دارای توابع نمایی، لگاریتمی، مثلثاتی و هذلولی هستند) مقایسه می‌کند تا بهترین عملکرد سیستم را تعیین کند.

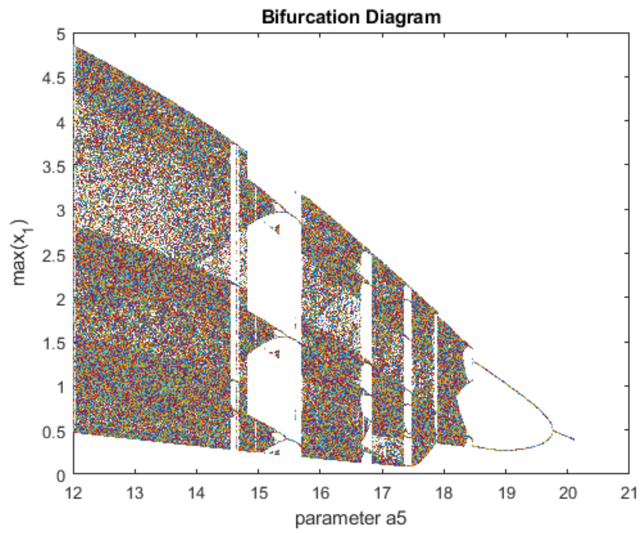
Table (3): Numerical values of the Kaplan-York dimension of the new hyper-chaotic system compared to similar systems
جدول (۳): مقادیر عددی بعد کاپلن-یورک سیستم فوق آشوبی جدید در مقایسه با سیستم‌های فوق آشوبی مشابه

سیستم	نمای لیاپانوف اول	نمای لیاپانوف دوم	نمای لیاپانوف سوم	نمای لیاپانوف چهارم	بعد کاپلن-یورک
سیستم (۱)، [۵۱]	۱۳/۴۶۳	۳/۴۷۸	۰	-۶۱/۲۳۱	۳/۲۷۸۶
سیستم (۲)، [۵۲]	۰/۱۵۷	۰	-۰/۲۴۵	-۰/۹۱۳	۲/۶۴۰۸
سیستم (۳)، [۵۳]	۰/۰۶۴	۰/۰۳۳	۰	-۱/۲۵	۳/۰۸۹
سیستم (۴)، [۵۴]	۰/۱۵۱۵	۰/۰۱۱۲	۰	۰/۶۶۲۳	۳/۰۹۷۹
سیستم (۵)، [۵۵]	۰/۱۳۲	۰/۰۳۵	۰	-۱/۲۵	۳/۱۳
سیستم (۶)، [۵۲]	۰/۱۵۵۵	۰/۰۳۳۰	۰	-۰/۶۱۰۰	۳/۱۱۷۱
سیستم (۷)، [۵۶]	۰/۱۹۰۶	۰/۰۴۵۰	۰/۰۰۰۲	-۰/۵۲۴۸	۳/۱۵۴۵
سیستم (۸)، [۵۷]	۱۳/۶۷۸۳۷	۰/۰۴۰۵۸	۰	-۴۵/۶۴۶۶	۳/۳۰۰۵۵
سیستم (۹)، [۵۸]	۰/۱۴۸۵	۰/۰۳۹۲	۰	-۱/۳۳۸	۳/۱۴۰۲
مقاله حاضر	**۸/۳۱۴۸**	**۱/۳۳۸۴**	**۰**	**-۲۴/۷۶۳۹**	**۳/۴۴۹۴**

۳-۴- نمودارهای دوشاخگی

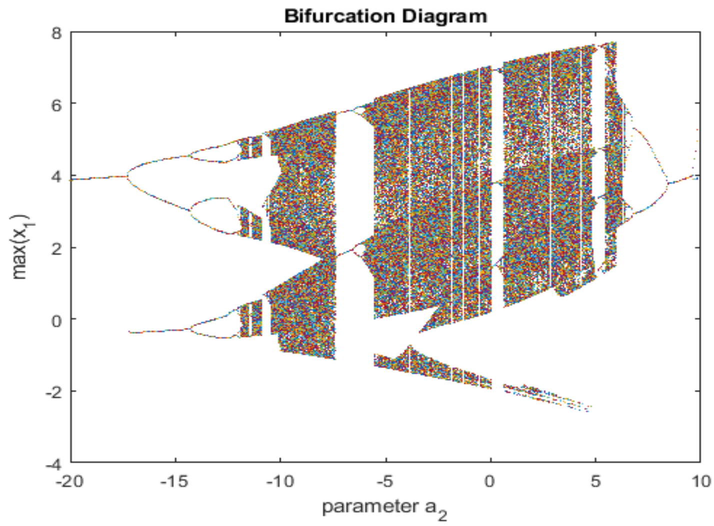
برای بررسی وابستگی پارامترهای سیستم فوق آشوبی جدید، از ترسیم و تحلیل نمودارهای دوشاخگی استفاده می‌شود. نمودارهای دوشاخگی سیستم فوق آشوبی ۴ بعدی جدید در شکل (۴) و (۵) نمایش داده شده‌اند. این سیستم با دو برابر شدن دوره معمول، وارد نوسانات آشوبی می‌شود. نمودارهای دوشاخگی، رفتار سیستم را با توجه به تغییر در پارامترهای سیستم نشان می‌دهند و رفتارهای جاذب سیستم را توضیح می‌دهند [۵۹].

Archive of SID



شکل (۴): نمودار دوشاخگی سیستم فوق آشوبی جدید (۱) در $(a_5,x_1), a5 \in (12,21)$

Figure (4): Bifurcation diagrams of the new system in (a_5,x_1), $a5 \in (12,21)$



شکل (۵): نمودار دوشاخگی سیستم فوق آشوبی جدید (۱) در $(a_5,x_1), a5 \in (-20,10)$

Figure (5): Bifurcation diagrams of the new system in (a_5,x_1), $a5 \in (-20,10)$

وقتی پارامتر a_2 در این محدوده باشد [شکل (۵) را ببینید]، سیستم رفتارهای پیچیده‌ای مانند فوق آشوبی، آشوبی، دوره‌ای[۲۷] و شبه دوره‌ای[۲۸] خواهد داشت. این تغییرات رفتاری، متناسب با تغییرات نماهای لیاپانوف در شکل (۶) نشان داده شده است. رفتارهای دینامیکی سیستم (۱) با تغییر در پارامتر دوم، شامل موارد زیر است:

۱) هنگامی‌که $a_2 \in (-2,5]$، نماهای لیاپانوف سیستم (۱) در a_2 برابر ۴ عبارتند از: ۸/۱۱۰۵، ۱/۸۹۲۳، ۰ و ۲۷/۴۲۴۹-. در این حالت، سیستم (۱) رفتار فوق آشوبی داشته و نمودارهای یک‌بعدی و سه‌بعدی سیستم در شکل (۶ نشان داده‌شده‌اند.

۲) هنگامی‌که $a_2 \in (-5,-2]$، نماهای لیاپانوف سیستم (۱) در a_2 برابر ۴- عبارتند از: ۴/۳۱۱۷، ۰، ۸/۸۰۱- و ۹/۰۶-. در این حالت، سیستم (۱) رفتار آشوبی داشته و نمودارهای یک‌بعدی و سه‌بعدی سیستم در شکل (۶ نشان داده‌شده‌اند.

۳) هنگامی‌که $a_2 \in (-10,-5]$، نماهای لیاپانوف سیستم (۱) در a_2 برابر ۶/۵- عبارتند از: ۳/۰۱۰۵، ۰، ۶/۲۶- و ۷/۰۳۸۷-. در این حالت، سیستم (۱) رفتار آشوبی داشته و نمودارهای یک‌بعدی و سه‌بعدی سیستم در شکل (۶) نشان داده‌شده‌اند.

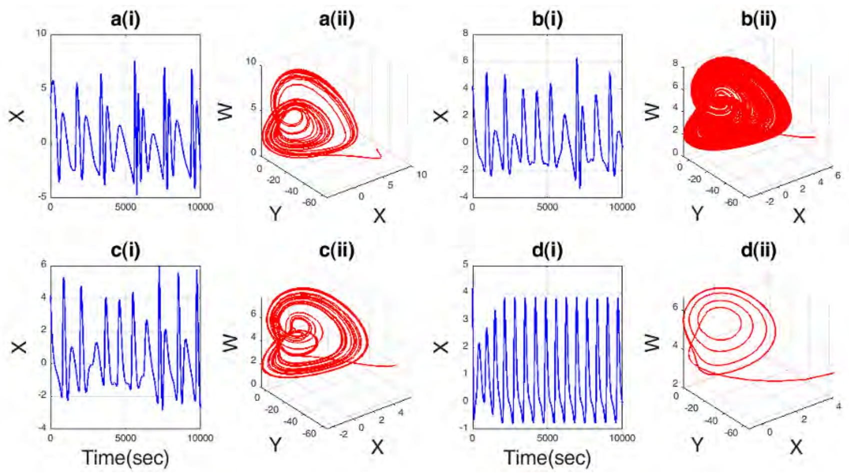
۴) هنگامی‌که $a_2 \in (-16,-10]$ و $a_2 \in (-22,-17]$ نماهای لیاپانوف سیستم (۱) در a_2 برابر ۱۵/۵- عبارتند از: ۱۷/۲۵۶-، ۱۸/۳۸-، ۰ و ۰. در این حالت، سیستم (۱) رفتار دوره‌ای داشته و نمودارهای یک‌بعدی و سه‌بعدی سیستم در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. این رفتارها در جدول (۴) نمایش داده شده‌اند.

www.SID.ir

Table (4): Dynamic behaviors of the new hyper-chaotic system with changes in Lyapunov Exponent and the second parameter

جدول (۴): رفتارهای دینامیکی سیستم فوق آشوبی جدید با تغییرات نماهای لیاپانوف و پارامتر دوم

پارامتر دوم	نماهای لیاپانوف	رفتارهای دینامیکی
(-۲ ، ۵]	(+, +, –, –, 0, 0)	فوق آشوبی
(-۵ ، -۲]	(+, –, –, –, 0, 0)	آشوبی
(-۱۰ ، -۵]	(+, –, –, –, 0, 0)	آشوبی
(-۱۶ ، -۱۰]	(0, –, –, –, 0, 0)	دوره‌ای
[-۱۷ ، -۲۲)	(0, 0, –, –, 0, 0)	شبه دوره‌ای

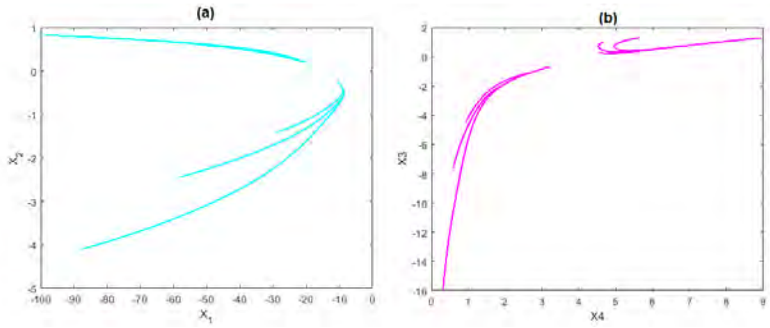


شکل (۶): سری‌های زمانی (i) و نمودارهای صفحه فاز(ii) سیستم (۱) با تغییرات در پارامتر دوم

Figure (6): Time series (i) and Phase portraits (ii) of the new system by changing the second parameter

۳-۵- نمودار پوانکاره

برای مطالعه عملکرد و رفتار سیستم‌های دینامیکی پیوسته، مشابه سیستم پیشنهادی (۱)، می‌توانیم از نقشه پوانکاره، یکی از محبوب‌ترین موضوعات در تحلیل دینامیک غیرخطی، استفاده کنیم. شکل (۷) نقشه‌های پوانکاره سیستم فوق آشوبی جدید را نمایش می‌دهد. مطابق با شکل، مجموعه منظم از نقاط نشان داده شده در نقشه‌های پوانکاره، نشانه رفتار آشوبی سیستم است.



شکل (۷): نقشه پوانکاره سیستم فوق آشوبی جدید (۱) در (الف) x_1-x_2 و (ب) x_4-x_3

Figure (7): Poincaré map of the new hyper-chaotic system

۴- همزمان‌سازی زمان محدود سریع

در این قسمت فرمول‌بندی و نتایج اصلی همزمان‌سازی زمان محدود بیان می‌شود.

۴-۱- فرمول‌بندی همزمان‌سازی زمان محدود

در این بخش، همزمان‌سازی زمان محدود سریع و قضیه‌های آن بین دو سیستم جدید و فوق آشوبی با پارامترها و شرایط اولیه مختلف ارائه شده است. در این مرحله، با استفاده از سیستم فوق آشوبی (۱) و با تغییر در شرایط اولیه و پارامترهای سیستم

Archive of SID

فوق آشوبی جدید، هر دو سیستم گیرنده و فرستنده برای همزمان‌سازی زمان محدود ساخته می‌شوند. سیستم فرستنده با معادلات (۱۳) و شرایط اولیه و پارامترهای (۱۴) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$dx_{im}(\tau)/d\tau=\begin{pmatrix}-a_{1m} & a_{1m}-a_{4m}x_{3m} & -a_{3m}x_{3m} & -a_{2m}\\ -a_{1m}x_{1m}-a_{8m}x_{2m} & -x_{1m}x_{3m}+a_{5m} & -a_{7m} & -a_{6m}\\ a_{1m}x_{1m} & x_{1m}x_{3m} & -a_{2m} & 0\\ -a_{11m}+a_{8m}x_{2m} & a_{10m}x_{3m}x_{4m} & a_{9m}+a_{7m}x_{1m}x_{2m} & a_{12m}x_{1m}x_{3m}\end{pmatrix}x_{im}$$
$$+\begin{pmatrix}a_4\tanh(x_{1m}+x_{2m}+x_{3m}+x_{4m})\\ -a_{9m}e^{(x_{3m})}\\ -a_{1m}e^{(x_{1m}+x_{2m}+x_{4m})}\\ a_{12m}e^{(x_{1m}+x_{2m}+x_{3m}+x_{4m})}\end{pmatrix}\quad \text{(for i=1,...,4)} \tag{۱۳}$$

$$\begin{aligned}&a_{jm}=(15,\ 4,\ 16,\ 8,\ 0.25,\ 23,\ 10,\ 3,\ 8.12,\ 5,\ 13,\ 20)\ \ (j=1,...,12)\\ &x_{im}(0)=(3.68,\ \ -21,\ 4.47,\ 10)\end{aligned} \tag{۱۴}$$

به‌طور مشابه برای سیستم گیرنده با معادلات (۱۵) و پارامترها و شرایط اولیه (۱۶) خواهیم داشت:

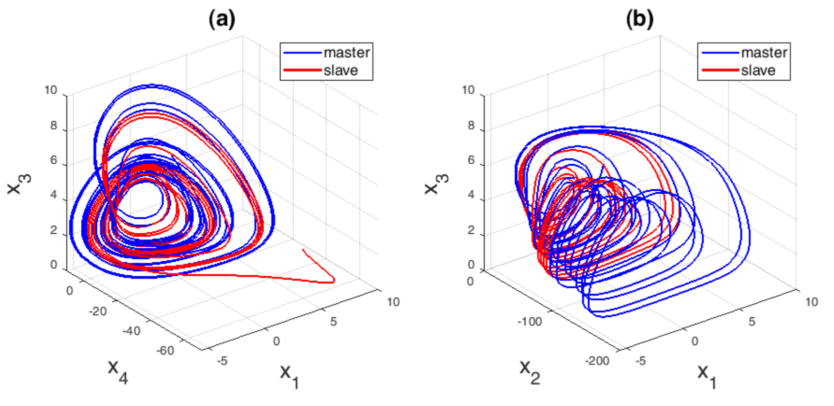
$$dx_{is}(\tau)/d\tau=\begin{pmatrix}-a_{1s} & a_{1s}-a_{4s}x_{3s} & -a_{3s}x_{3s} & -a_{2s}\\ -a_{1s}x_{1s}-a_{8s}x_{2s} & -x_{1s}x_{3s}+a_{5s} & -a_{7s} & -a_{6s}\\ a_{1s}x_{1s} & x_{1s}x_{3s} & -a_{2s} & 0\\ -a_{11s}+a_{8s}x_{2s} & a_{10s}x_{3s}x_{4s} & a_{9s}+a_{7s}x_{1s}x_{2s} & a_{12s}x_{1s}x_{3s}\end{pmatrix}x_{is}$$
$$+\begin{pmatrix}a_4\tanh(x_{1s}+x_{2s}+x_{3s}+x_{4s})\\ -a_{9m}e^{(x_{3s})}\\ -a_{1s}e^{(x_{1s}+x_{2s}+x_{4s})}\\ a_{12s}e^{(x_{1s}+x_{2s}+x_{3s}+x_{4s})}\end{pmatrix}+g_i(x(\tau))\upsilon(\tau)+d_i(\tau)\quad \text{(for i=1,...,4)} \tag{۱۵}$$

$$\begin{aligned}&a_{jm}=(14.2,\ 3.5,\ 15.1,\ 9.6,\ 0.2,\ 20.7,\ 11.8,\ 1.7,\ 8,\ 6.3,\ 12.7,\ 22)\ \ (j=1,...,12)\\ &x_{im}(0)=(13,\ \ -30,\ 6,\ 7)\end{aligned} \tag{۱۶}$$

که در آن $X_{m,s}=x_{1m,s},\ldots,x_{4m,s}$ متغیرهای حالت سیستم‌های (۱۳) و (۱۵)، $d_i(\tau)$ مجموع نامعینی‌های سیستم، $g_i(x(\tau))$ بهره‌های کنترل‌کننده و $v(\tau)=v_1,\ldots,v_4$ سیگنال‌های غیرخطی برای همزمان‌سازی سیستم‌های گیرنده و فرستنده هستند.

$$d_i(\tau)=\begin{pmatrix}\sin(\tau)+1.5\\ 2\sin(6\tau)-1\\ 3\sin(2\tau)+0.1\\ 4\sin(4\tau)+0.5\end{pmatrix} \tag{۱۷}$$

سیستم فرستنده (۱۳) و سیستم گیرنده (۱۵) با پارامترها و شرایط اولیه (۱۴) و (۱۶) و با اعمال ترم نامعینی (۱۷) در حالت سه‌بعدی بدون اعمال کنترل‌کننده در شکل (۸) نشان داده شده‌اند.



شکل (۸): نمودارهای صفحه فاز سیستم‌های گیرنده (۱۵) و فرستنده (۱۳)

Figure (8): Phase portrait diagrams of master and slave systems

www.SID.ir

فرض (۱): برای همزمان‌سازی زمان محدود سریع با توجه به سیستم‌های گیرنده و فرستنده، خطا به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$e_i = x_{is} - x_{im} \quad (i=1,...,5) \tag{۱۸}$$

فرض (۲): به‌طورکلی، محدودیت‌های موجود در نامعینی‌ها و اغتشاشات را به‌صورت زیر در نظرخواهیم گرفت:

$$\left|f(x(\tau))\right| \le \alpha_1 \ , \ \left|d(\tau)\right| \le \alpha_2 \tag{۱۹}$$

که در آن آلفاها ثابت‌های ناشناخته مثبت هستند.

فرض (۳): فرض کنید $y_i(\tau)=x_i(\tau)$ بنابراین:

$$\lim_{\tau\to\infty} e_i(\tau)=0 \tag{۲۰}$$

تعریف (۱) [۶۰]: سیستم‌های فرستنده و گیرنده (۱۳) و (۱۵) می‌توانند در زمان محدود همزمان شوند اگر $\lim\|error(\tau)\|=0$ و $\|error(\tau)\|=0$ برای $\tau>=0$ جایی که $T=T\|error(\tau)\|>0$ و $error(\tau)=[\ error_i]^T$

به‌عبارت‌دیگر اگر حد خطای زمانی τ در زمان محدود T به صفر میل کند، همزمان‌سازی زمان محدود را خواهیم داشت.

تعریف (۲) [۶۱]: سیستم‌های فرستنده (۱۳) و گیرنده (۱۵) در زمان محدود همزمان می‌شوند اگر برای کنترل‌کننده $Up(\tau)$ یک ثابت $T>0$ وجود داشته باشد به‌طوری‌که:

$$\lim_{\tau\to T}\left|x_{is}(\tau)-x_{im}(\tau)\right|=0 \tag{۲۱}$$

جایی که $x_{im}(\tau)$ معادلات مربوط به سیستم فرستنده (۱۳) و $x_{is}(\tau)$ معادلات مربوط به سیستم فرستنده (۱۵) هستند.

۴-۲- نتایج اصلی برای همزمان‌سازی زمان محدود

سیستم غیرخطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x}(\tau)=f(x(\tau),\tau)+g(x(\tau),\tau)u(\tau)+d(x(\tau),\tau). \tag{۲۲}$$

جایی که $x\ (\tau)=[\ x_s(\tau), x_s(\tau)]^T$ معادلات حالت، $u(\tau)$ ورودی کنترل، $g(x(\tau))$ گین کنترلی و $f(x(\tau))$ توابع غیرخطی و $d(x(\tau),\tau)$ مجموع نامعینی‌ها و اغتشاشات سیستم هستند که طبق فرض (۲) محدود هستند و به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$d(x(\tau))=\Delta f(x(\tau))+\Delta g(x(\tau))u(\tau)+d_1(\tau) \tag{۲۳}$$

با محاسبه حد بالای $d(x(\tau))$ خواهیم داشت:

$$\|d(x(\tau))\| \le \|\Delta f(x(\tau))\|+\|\Delta g(x(\tau))\|\|u(\tau)\|+\|d_1(\tau)\| \tag{۲۴}$$

با توجه به فرضیات زیر:

$$\|\Delta f(x(\tau))\| \le \alpha\theta\left(\|x(\tau)\|\right), \|\Delta g(x(\tau))\| \le \beta v\left(\|x(\tau)\|\right), \ \|d_1(\tau)\| \le \Theta_1 \tag{۲۵}$$

می‌توان حد بالای $d(x(\tau))$ را به‌صورت زیر نوشت:

$$\|d(x(\tau))\| \le \alpha\theta\left(\|x(\tau)\|\right)+\beta v\left(\|x(\tau)\|\right)U_m+\Theta_1 \tag{۲۶}$$

مجموع توابع غیرخطی معادله (۲۶) را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\alpha\theta\left(\|x(\tau)\|\right)+\beta v\left(\|x(\tau)\|\right)U_m=\Theta_2\Psi_3\left(\|x(\tau)\|\right) \tag{۲۷}$$

بنابراین حد بالای $d(x(\tau))$ در معادله (۲۶) را به‌صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\|d(x(\tau))\| \le \Theta_2\Psi_3\left(\|x(\tau)\|\right)+\Theta_1 \tag{۲۸}$$

جایی که سای و دلتا ثابت‌های مثبت نامعلوم و $\|x(\tau)\|$ مجموع ترم‌های غیرخطی هستند.

هدف کنترلی این است که سیستم غیرخطی (۲۲) مسیرهای سیستم مرجع $x_{im}(\tau)$ را ردیابی کند، بنابراین، خطاهای ردیابی را به‌صورت زیر تشکیل می‌دهیم:

$$e_i(\tau)=x_{is}(\tau)-x_{im}(\tau) \quad (i=1,...,4) \tag{۲۹}$$

Archive of SID

فرض (۴): توابع غیرخطی $d(x(\tau))$ و $g(x(\tau), \tau)$ و $f(x(\tau), \tau)$ متغیر با زمان هستند. سطح لغزش[۲۹] را برای سیستم (۲۲) به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم [۶۲]:

$$\delta(\tau)=\tanh^2\left(\int_0^t \xi\dot{e}(\tau)d\tau+\int_0^t \xi(f(x(\tau))+\dot{x}_m(\tau))d\tau\right)$$ (۳۰)

جایی که زتا متعلق به R^{i*1} ثابت‌های مثبت دلخواه هستند. با ترکیب معادلات (۲۲) و (۲۹) و جایگذاری در معادله (۳۰)، مشتق زمانی سطح لغزش به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$\dot{\delta}(\tau)=\left(\xi\dot{e}(\tau)+\xi e(\tau)\right)\operatorname{sech}^4(\tanh(\delta))$$ (۳۱)

قضیه (۱) [۶۳]: معادله خطای (۲۹) را در نظر بگیرید. با در نظر گرفتن مشتق سطح لغزش با معادله (۳۱)، حالت‌های سیستم در زمان محدود به مبدأ همگرا شده و همزمان‌سازی زمان محدود را خواهیم داشت.

قضیه (۲): معادلات کلی (۲۲) را در نظر بگیرید. با در نظر گرفتن معادله خطا (۲۹)، کنترل‌کننده مودلغزشی ترمینال سریع به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u(\tau)=(\xi B)^{-1}\left(\xi\dot{x}_{im}(\tau)-\psi_1\delta(\tau)-\operatorname{sign}(\delta(\tau))\left(\psi_2+\Theta_1\|\xi\|+\Theta_2\|\xi\|\psi_3 e^{-\|x_{im}\|}\right)\right)$$ (۳۲)

جایی که B بهره‌های کنترلی و دلتاها به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\dot{\Theta}_1=k_1\|\delta\|\|\xi\|\operatorname{sech}^4(\tanh(\delta))$$
$$\dot{\Theta}_2=k_2\|\delta\|\|\xi\|\psi_3 e^{-\|x_{im}\|}\operatorname{sech}^4(\tanh(\delta))$$ (۳۳)

اثبات: قبل از تحلیل پایداری نشان خواهیم داد کنترل‌کننده پیشنهادی (۳۲) محدود است. با فرض

$$p(\tau)=\int_0^t \xi\dot{e}(\tau)d\tau+\int_0^t \xi(f(x(\tau))+\dot{x}_m(\tau))d\tau$$ (۳۴)

و محدود بودن سطح لغزش خواهیم داشت:

$$\|\delta(\tau)\|=\sqrt{\|\delta_1(\tau)\|^2+\|\delta_2(\tau)\|^2+...+\|\delta_m(\tau)\|^2}=\sqrt{\|\tanh^2(p_1(\tau))\|^2+\|\tanh^2(p_2(\tau))\|^2+...+\|\tanh^2(p_m(\tau))\|^2}$$ (۳۵)

با توجه به اینکه برای i های از یک تا m، $|\tanh^2(p_i(\tau))|$ کوچکتر یا مساوی یک می باشد، بنابراین حد بالای سطح لغزش برابر است با:

$$\text{with } \|\delta(\tau)\|\le\sqrt{\underbrace{1+1+...+1}_{m}}=\sqrt{m}\Rightarrow\|\operatorname{sign}(\delta(\tau))\|\le\sqrt{m}$$ (۳۶)

از طرف دیگر، با توجه به تعریف تابع علامت در معادله (۳۶)، می‌توان حد بالای قانون کنترلی طراحی‌شده (۳۲) را به‌صورت زیر به‌دست آورد:

$$\|u(\tau)\|\le\|(\xi B)^{-1}\|\left\|\left(\xi\dot{x}_{im}(\tau)-\psi_1\delta(\tau)-\operatorname{sign}(\delta(\tau))\left(\psi_2+\Theta_1\|\xi\|+\Theta_2\|\xi\|\psi_3 e^{-\|x_{im}\|}\right)\right)\right\|$$ (۳۷)

حد بالا در معادله (۳۷) را می‌توان محدود و به‌صورت زیر تعریف کرد:

$$\Theta_1\|\xi\|+\Theta_2\|\xi\|\psi_3\left\|e^{-\|x_{im}\|}\right\|\le\Theta_1 H+\Theta_2 HW=H(\Theta_1+\Theta_2 W)$$ (۳۸)

با در نظر گرفتن معادلات (۳۵) و (۳۶) و مثبت بودن تمام پارامترها حد بالای کنترل‌کننده برابر خواهد بود با:

$$\|u(\tau)\|\le\|(\xi B)^{-1}\|\left\|\left(\xi\dot{x}_{im}(\tau)+\psi_1\sqrt{m}+\left(\psi_2+H(\Theta_1+\Theta_2 W)\right)\sqrt{m}\right)\right\|$$ (۳۹)

درنهایت، حد بالای کنترل‌کننده را با فرض محدود بودن کنترل‌کننده به‌صورت زیر خواهیم داشت:

$$\|u(\tau)\|\le M\left(N+\psi_1\sqrt{m}+\left(\psi_2+H(\Theta_1+\Theta_2 W)\right)\sqrt{m}\right)$$ (۴۰)

در ادامه اثبات پایداری کنترل‌کننده طراحی‌شده (۳۲) را دنبال خواهیم نمود.

اثبات پایداری: تابع کاندید لیاپانوف را به‌صورت زیر در نظر بگیرید:

$$\vartheta(\tau)=0.5\delta^T(\tau)\delta(\tau)$$ (۴۱)

با مشتق‌گیری از تابع کاندید لیاپانوف (۴۱) خواهیم داشت:

$$\dot{\vartheta}(\tau)=\delta^T(\tau)\dot{\delta}(\tau)=\delta^T(\tau)\left(\xi\dot{e}(\tau)-\xi f(e(\tau))+\xi\dot{x}_m(\tau)\right)\cosh^4(\tanh(\delta(\tau)))$$ (۴۲)

www.SID.ir

با جایگذاری معادله (۲۲) در مشتق تابع کاندید لیاپانوف (۴۲) خواهیم داشت:

$$\dot{J}(\tau)=\delta^{T}(\tau)\left(\left(\xi g(e(\tau))u(\tau)\right)+\xi d(\tau)+\xi\dot{x}_{m}\right)\operatorname{sech}^{4}(\tanh(\delta(\tau))) \tag{۴۳}$$

با جایگذاری کنترل‌کننده (۳۲) در معادلات (۴۳) خواهیم داشت:

$$\dot{\vartheta}(\tau)=\left\{\delta^{T}(\tau)\left(-\psi_{1}\delta(\tau)-\operatorname{sign}(\delta(\tau))\right)\left(\psi_{2}+\Theta_{1}\|\xi\|+\Theta_{2}\|\xi\|\psi_{3}e^{-\|x_{m}(\tau)\|}\right)+\xi d(\tau)\right\}\operatorname{sech}^{4}(\tanh(\delta(\tau))) \tag{۴۴}$$

حد بالای معادله (۴۴) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\dot{\vartheta}(\tau)\leq\left\{-\psi_{1}\|\delta(\tau)\|^{2}-\|\delta(\tau)\|\left(\psi_{2}+\Theta_{1}\|\xi\|+\Theta_{2}\|\xi\|\psi_{3}e^{-\|x_{m}(\tau)\|}\right)+\|\delta(\tau)\|\|\xi\|\left(\Theta_{2}\psi_{3}e^{-\|x_{m}(\tau)\|}\|e(\tau)\|+\Theta_{1}\right)\right\}\operatorname{sech}^{4}(\tanh(\delta(\tau))) \tag{۴۵}$$

جایی که نرم خطا محدود و به صورت زیر است:

$$\|e(\tau)\|=\bar{\Theta}_{2}\psi_{3}(\|x(\tau)\|)+\bar{\Theta}_{1} \tag{۴۶}$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\dot{\vartheta}(\tau)\leq\left\{-\psi_{1}\|\delta(\tau)\|^{2}-\psi_{2}\|\delta(\tau)\|-\|\delta(\tau)\|\|\xi\|\Theta_{1}-\|\delta(\tau)\|\|\xi\|\psi_{3}e^{-\|x_{m}(\tau)\|}\|e(\tau)\|+\Theta_{2}\right\}\operatorname{sech}^{4}(\tanh(\delta(\tau))) \tag{۴۷}$$

با جایگذاری معادله (۳۳) در (۴۷) خواهیم داشت:

$$\dot{\vartheta}(\tau)\leq-\psi_{1}\|\delta(\tau)\|^{2}-\psi_{2}\|\delta(\tau)\|\operatorname{sech}^{4}(\tanh(\delta(\tau))) \tag{۴۸}$$

با در نظر گرفتن سای‌های مثبت، مشتق تابع کاندید لیاپانوف (۴۱) به‌تدریج کاهشی شده و سطح لغزش (۳۰) در زمان محدود به مبدأ همگرا می‌شود. درنتیجه این اثبات کامل می‌شود.

قضیه (۳) [۶۳]: با فرض وجود یک تابع پیوسته دیفرانسیلی $v(x)$ که در همسایگی U از مبدا قرار دارد و با فرض وجود مقادیر حقیقی $c>0$ و آلفا بین صفر و یک به گونه‌ای که:

۱) $\vartheta(x)$ یک تابع حقیقی مثبت معین باشد.

۲) $\dot{\vartheta}(x)+c\vartheta^{\alpha}(x)\leq 0 \quad \forall x\in U$

وجود خواهد داشت یک U_0 متعلق به R^n برای تابع $v(x)$ که از نقطه U_0 شروع شده و می تواند در زمان محدود به $v(x)=0$ برسد.

اثبات: با توجه به اینکه تابع $\operatorname{sech}^4(\tanh(x(\tau)))$ بین صفر و یک قرار دارد، معادله (۴۴) را به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{\vartheta}(\tau)\leq\delta^{T}(\tau)\left(-\psi_{1}\delta(\tau)-\operatorname{sign}(\delta(\tau))\right)\left(\psi_{2}+\Theta_{1}\|\xi\|+\Theta_{2}\|\xi\|\psi_{3}\|x(\tau)\|\right)+\xi\|e(\tau)\| \tag{۴۹}$$

با جایگذاری معادله (۴۶) در معادله (۴۹) خواهیم داشت:

$$\dot{\vartheta}(\tau)\leq-\psi_{1}\|\delta(\tau)\|^{2}-\psi_{2}\|\delta(\tau)\|-\|\delta(\tau)\|\|\xi\|\left((\Theta_{1}-\bar{\Theta}_{1})\|\xi\|+(\Theta_{2}-\bar{\Theta}_{2})\|\xi\|\psi_{3}\left(\|x(\tau)\|\right)\right) \tag{۵۰}$$

بنابراین:

$$\dot{\vartheta}(\tau)\leq-\psi_{1}\|\delta(\tau)\|^{2}-\psi_{2}\|\delta(\tau)\|-\|\delta(\tau)\|\|\xi\|\left(\tilde{\Theta}_{1}\|\xi\|+\tilde{\Theta}_{2}\|\xi\|\psi_{3}\left(\|x(\tau)\|\right)\right) \tag{۵۱}$$

با توجه به معادله (۳۳) می توان نتیجه گرفت وقتی t به سمت بی نهایت میل می کند، خواهیم داشت::

$$\text{if } t\rightarrow\infty\Rightarrow\tilde{\Theta}_{1}\rightarrow 0,\ \tilde{\Theta}_{2}\rightarrow 0\ \Rightarrow\|\tilde{\Theta}_{1}\|\leq\Theta_{1n}\ ,\ \|\tilde{\Theta}_{2}\|\leq\Theta_{2n} \tag{۵۲}$$

جایی که توابع دلتا ثابت های مثبت دلخواه هستند. بنابراین با توجه به موارد عنوان شده و با استفاده از قضیه (۳)، معادله (۵۱) را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$\dot{\vartheta}(\tau)\leq-\psi_{1}\|\delta(\tau)\|^{2}-\psi_{2}\|\delta(\tau)\|+\|\delta(\tau)\|\|\xi\|(\Theta_{1n}+\Theta_{2n}W) \tag{۵۳}$$

با فرض تابع z به صورت زیر، معادله (۵۳) را می توان به صورت مشتق تابع کاندید لیاپانوف زیر بیان نمود:

$$\text{if } z=\|\xi\|(\Theta_{1n}+\Theta_{1n}W)\Rightarrow\dot{\vartheta}(\tau)\leq-\psi_{1}\|\delta(\tau)\|^{2}-\psi_{2}\|\delta(\tau)\|+\|\delta(\tau)\|z \tag{۵۴}$$

بنابراین:

Archive of SID

$$\dot{\vartheta}(\tau) \le -\psi_1 \|\delta(\tau)\|^2 - (\psi_2 - z)\|\delta(\tau)\| \qquad (۵۵)$$

با در نظر گرفتن فرضیات زیر، مشتق تابع لیاپانوف را به صورت (۵۶) به‌دست خواهیم آورد:

$$\text{if } \; \psi = \psi_2 - z, \; \psi_2 > z \;\; \Rightarrow \dot{\vartheta}(\tau) \le -\psi_1 \|\delta(\tau)\|^2 - \psi\|\delta(\tau)\| \qquad (۵۶)$$

بدیهی است که:

$$\text{if } \; -\psi_1 \|\delta(\tau)\|^2 - \psi_2 \|\delta(\tau)\| \le -\psi\|\delta(\tau)\| \;\; \Rightarrow \dot{\vartheta}(\tau) \le -\psi\|\delta(\tau)\| \qquad (۵۷)$$

از طرف دیگر با توجه به تعریف نرم سطح لغزش به‌صورت (۵۸) است، معادله (۵۷) را به‌صورت زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$\|\delta(\tau)\| = \sqrt{2}\vartheta^{1/2}(\tau) \;\Rightarrow \dot{\vartheta}(\tau) \le -\psi\sqrt{2}\vartheta^{1/2}(\tau) \qquad (۵۸)$$

به عبارت دیگر:

$$\dot{\vartheta}(\tau) + \sqrt{2}\psi\,\vartheta^{1/2}(\tau) \le 0 \qquad (۵۹)$$

بنابراین فرض (۳) برآورده شده و اثبات کامل می‌شود.

۵- نتایج همزمان‌سازی زمان محدود سریع

در این بخش همزمان‌سازی زمان محدود بین دو سیستم فوق آشوبی ۴ بعدی با نامعینی‌ها و اغتشاشات ناشناخته و عدم قطعیت پارامتری را برای سیستم انجام می‌دهیم. در این قسمت از هر دو سیستم فرستنده و سیستم گیرنده برای همزمان‌سازی استفاده کرده‌ایم. شایان‌ذکر است که اگرچه سیستم‌های فرستنده و گیرنده یکسان هستند، اما دارای پارامترهای نابرابر و شرایط اولیه مختلف هستند. بر اساس فرض (۱)، برای مطالعه همزمان‌سازی زمان محدود، خطا را مطابق با سیستم‌های گیرنده و فرستنده به شرح زیر طراحی می‌کنیم:

$$e_i = \sum_{i=1}^{4} y_i - x_i \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \\ \dot{e}_3 \\ \dot{e}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1e_1 + a_1e_2 - a_2e_4 + f_1(\tau) \\ a_5e_2 + a_6e_4 + f_2(\tau) \\ -a_2e_3 + f_3(\tau) \\ -a_1e_1 + a_9e_3 + f_4(\tau) \end{bmatrix} + B(\tau)\upsilon(\tau) + D(\tau)$$

$$\begin{gathered} \left(\begin{aligned} & f_1(\tau) = a_{3m}x_{3m}^2 + a_{4m}x_{2m}x_{3m} - a_{3s}x_{3s}^2 - a_{4s}x_{2s}x_{3s} \\ & + a_{4s}\tanh(x_{1s} + x_{2s} + x_{3s} + x_{4s}) - a_4 \tanh(-x_{1m} - x_{2m} - x_{3m} - x_{4m}) \end{aligned} \right) \\ \left(\begin{aligned} & f_2(\tau) = a_{1m}x_{1m}^2 + a_{7m}x_{2m}x_{3m} + a_{8m}x_{1m}x_{2m} + x_{1m}x_{2m}x_{3m} + a_{9m}e^{-x_{3m}} \\ & -a_{1s}x_{1s}^2 - a_{7s}x_{2s}x_{3s} - a_{8s}x_{1s}x_{2s} - x_{1s}x_{2s}x_{3s} - a_{9s}e^{x_{3s}} \end{aligned} \right) \\ \left(f_3(\tau) = -a_{10m}x_{1m}^2 - x_{1m}x_{2m}x_{3m} + a_{1m}e^{-(x_{1m}+x_{2m}+x_{4m})} + a_{10s}x_{1s}^2 + x_{1s}x_{2s}x_{3s} - a_{1s}e^{(x_{1s}+x_{2s}+x_{4s})} \right) \\ \left(\begin{aligned} & f_4(\tau) = -a_{7m}x_{1m}x_{2m}x_{3m} - a_{8m}x_{1m}x_{2m} - a_{10m}x_{2m}x_{3m}x_{4m} - a_{12m}x_{1m}x_{3m}x_{4m} - a_{12m}e^{-(x_{1m}+x_{2m}+x_{3m}+x_{4m})} \\ & + a_{7s}x_{1s}x_{2s}x_{3s} + a_{8s}x_{1s}x_{2s} + a_{10s}x_{2s}x_{3s}x_{4s} + a_{12s}x_{1s}x_{3s}x_{4s} + a_{12s}e^{(x_{1s}+x_{2s}+x_{3s}+x_{4s})} \end{aligned} \right) \end{gathered} \qquad (۶۰)$$

معادلات (۶۰) در فرم ماتریس به‌صورت زیر هستند:

$$\frac{de_i(\tau)}{d\tau} = \Lambda e_i(\tau) + f(e(\tau)) + B(\tau)\upsilon(\tau) + D(\tau) \qquad (۶۱)$$

جایی که:

$$\begin{gathered} e_i(\tau) = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix}, \; B(\tau) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \; f(e(\tau)) = \begin{bmatrix} f_1(\tau) \\ f_2(\tau) \\ f_3(\tau) \\ f_4(\tau) \end{bmatrix} \\ \Lambda = \begin{bmatrix} -a_1 & a_1 & 0 & -a_2 \\ 0 & a_5 & 0 & a_6 \\ 0 & 0 & -a_2 & 0 \\ -a_1 & 0 & a_6 & 0 \end{bmatrix}, \; D(\tau) = \begin{pmatrix} \sin(\tau) + 1.5 \\ 2\sin(6\tau) - 1 \\ 3\sin(2\tau) + 0.1 \\ 4\sin(4\tau) + 0.5 \end{pmatrix} \end{gathered} \qquad (۶۲)$$

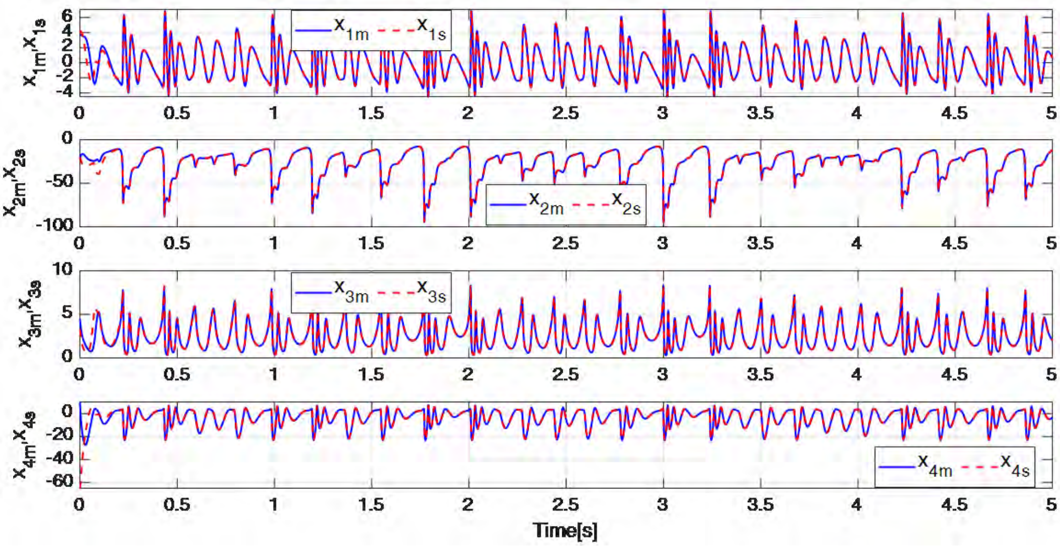
www.SID.ir

در ادامه با استفاده از پارامترها و شرایط اولیه (۱۴) و (۱۶) اطمینان داریم که همزمان‌سازی بین دو سیستم فرستنده و گیرنده با معادله خطا (۶۲) در مدت‌زمان محدود، محقق خواهد شد؛ بنابراین با توجه به طراحی کنترل‌کننده مودلغزشی ترمینال، ما از کنترل‌کننده تعریف‌شده در (۳۲) استفاده می‌کنیم. با توجه به قانون کنترل مودلغزشی، بهره‌های کنترل‌کننده را به‌صورت زیر انتخاب می‌کنیم:

$$\xi=(\xi_1,\xi_2,\xi_3,\xi_4)=(0.1,\ 0.01,\ 0.1,\ 0.01) \tag{۶۳}$$

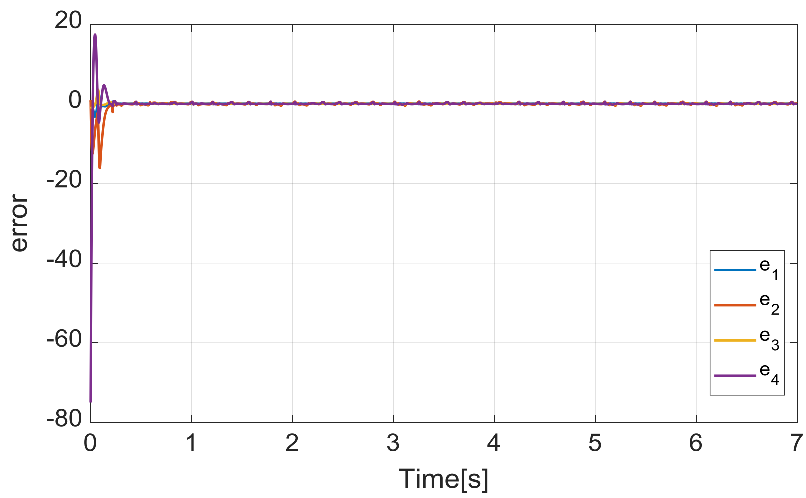
نامعینی‌ها و ضرایب کنترل‌کننده را به‌صورت مشخص‌شده در معادله (۶۲) در نظر می‌گیریم. در معادله (۳۳) پارامترها را به‌صورت $k_1=110,\ k_2=-1500$ انتخاب می‌کنیم. قانون کنترل (۳۲) طوری طراحی‌شده است که با سای برابر با [۴۵ ۸۵] همزمان‌سازی زمان محدودِ سیستم‌های فوق و $B(\tau)=[1\ 1\ 1\ 1]^T$ آشوبی گیرنده و فرستنده انجام شود. شکل (۹) همزمان‌سازی زمان محدود سریع بین سیستم‌های گیرنده و فرستنده را نمایش می‌دهد. وقتی کنترل‌کننده فعال است، خطاهای همزمان-سازی به‌صورت شکل (۱۰) نمایش داده می‌شوند.

با توجه به نتایج شبیه‌سازی [شکل (۹) و شکل (۱۰) را ببینید] ، علی‌رغم اینکه ثابت کردیم سیستم فوق آشوبی جدید طراحی‌شده دارای نوسانات زیادی است، کنترل‌کننده (۳۲) توانسته خطا را در t=۰/۳۱۹ ثانیه به صفر برساند. بنابراین، به‌راحتی می‌توان مشاهده کرد که سیستم‌های فوق آشوبی گیرنده و فرستنده در زمان محدود همگرا می‌شوند.



شکل (۹): همزمان‌سازی زمان محدود سریع بین دو سیستم گیرنده و فرستنده

Figure (9): Fast finite-time synchronization between master and slave systems



شکل (۱۰): خطاهای همزمان‌سازی با فعال شدن کنترل‌کننده

Figure (10): Synchronization errors with controller activation

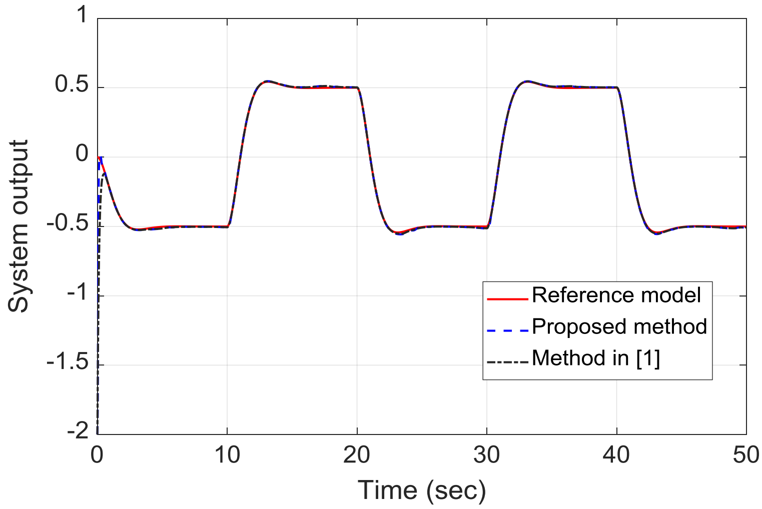
www.SID.ir

Archive of SID

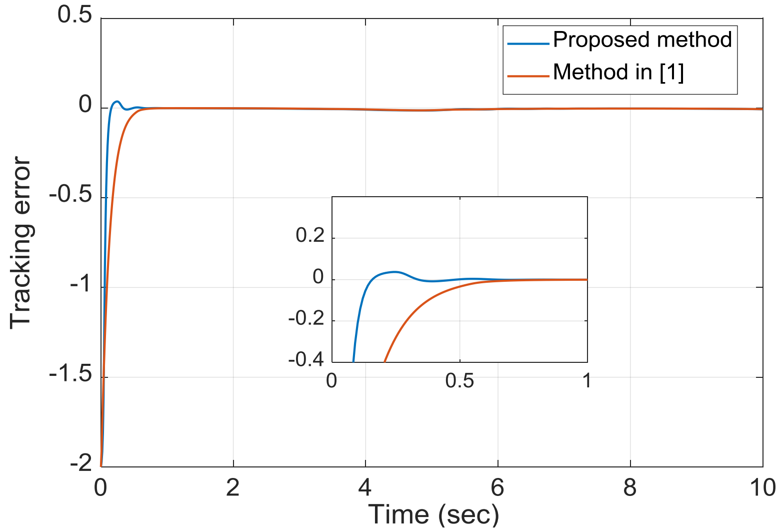
در ادامه، برای ارزیابی بهتر عملکرد کنترل‌کننده طراحی‌شده (۳۲)، عملکرد آن را با کنترل‌کننده مودلغزشی ترمینال مشابه در مرجع [۱] مقایسه می‌کنیم. در شکل (۱۱) مقایسه ای بین خروجی سیستم با استفاده از کنترل‌کننده (۳۲) و سیستم طراحی‌شده در مرجع [۱] در مقایسه با مدل مرجع[۳۰] انجام شده است. در این شکل ابتدا یک سیگنال مرجع به هر دو کنترل کننده اعمال کرده و پاسخ سیستم ها را به ورودی مرجع به دست آورده ایم. سپس، خروجی این دو کنترل کننده را با سیگنال مرجع مقایسه کرده ایم و همانطور که مشخص است کنترل کننده طراحی شده در این مقاله سریع‌تر به سیگنال مرجع همگرا شده است.

پاسخ زمانی خطاهای ردیابی[۳۱] در شکل (۱۲) نشان داده‌شده است. همان‌طور که از شکل (۱۲) مشخص است، سیگنال خطای ردیابی به‌طور مناسب به مبدأ همگرا شده و ردیابی سریع‌تری را نسبت به روش مرجع [۱] فراهم می‌کند.

سرعت واکنش سیستم در برابر تغییرات بسیار کم در شرایط اولیه، قدرت حساسیت سیستم را نشان می‌دهد. یک تغییر بسیار کوچک در شرایط اولیه، سیگنال خروجی متفاوتی را ایجاد می‌کند. هرچه زمان واکنش به این تغییرات کم‌تر باشد، سیستم پیچیده‌تر و آشوبی تر است [۶۵]. در شکل (۱۳)، مقایسه‌ای بین سیستم‌های فوق آشوبی مشابه با سیستم فوق آشوبی جدید ازلحاظ سرعت واکنش (جدایی) به تغییرات بسیار اندک در شرایط اولیه، انجام‌شده است.



شکل (۱۱): خروجی سیستم
Figure (11): Out put system



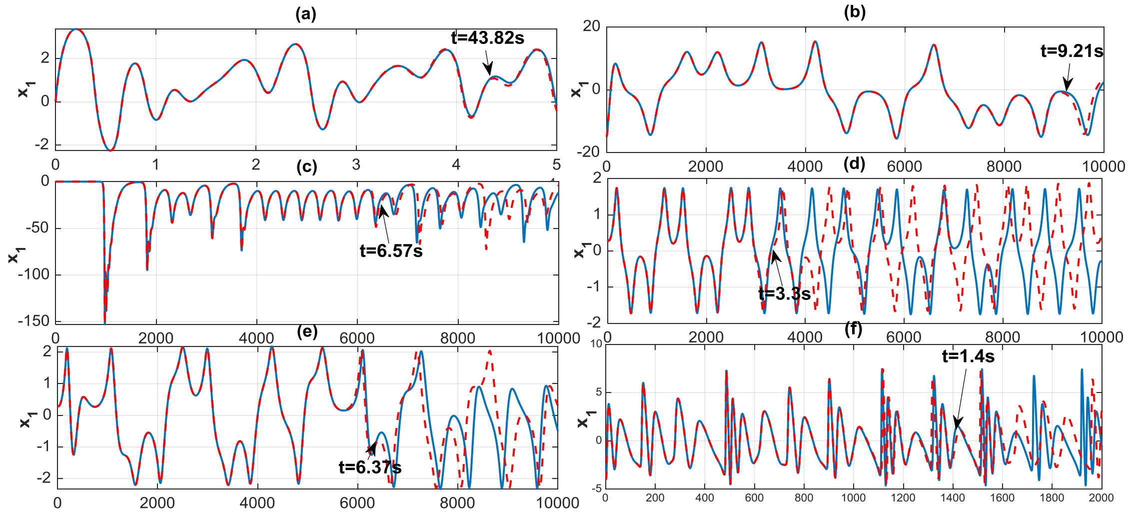
شکل (۱۲): خطاهای ردیابی
Figure (12): Tracking errors

www.SID.ir

همان‌طور که عنوان شد یکی از اصلی‌ترین ویژگی سیستم‌های آشوبی واکنش به تغییر در شرایط اولیه است و هرچه سیستم واکنش سریع‌تری نسبت به این تغییر داشته باشد از خاصیت آشوبی بیشتری برخوردار است. بر اساس نتایج، سیستم فوق آشوبی طراحی‌شده در این مقاله واکنش زمانی سریع‌تری را نسبت به تغییرات بسیار اندک در شرایط اولیه یکسان از خود نشان داده است، ازاین‌رو پیچیده‌تر از سیستم‌های مشابه است.

۶-نتیجه‌گیری

در این مقاله یک سیستم فوق آشوبی جدید پیچیده معرفی شد. تجزیه‌وتحلیل‌های استاندارد سیستم‌های آشوبی ازجمله نمودار دوشاخگی، نقاط تعادل، نقشه پوانکاره، بعد کاپلان-یورک و نماهای لیاپانوف انجام گرفت. از خصوصیات سیستم‌های فوق آشوبی می‌توان به پیچیدگی بالاتر، مقاومت پارامتری بیشتر و حساسیت شدید به تغییرات بسیار کوچک در شرایط اولیه اشاره کرد. ثابت نمودیم که سیستم فوق آشوبی جدید بسیار پیچیده‌تر از سیستم‌های فوق آشوبی مشابه است که می‌تواند برای استفاده در رمزنگاری و پنهان‌سازی اطلاعات بسیار ارزشمند باشد.



شکل (۱۳): نتایج شبیه‌سازی برای سرعت واکنش زمانی سیستم فوق آشوبی جدید (f) در مقایسه با سیستم‌های فوق آشوبی مشابه

Figure (13): Simulation results for the temporal reaction rate of the new hyper-chaotic system (f) in comparison with similar hyper-chaotic systems

در مرحله بعدی، یک کنترل‌کننده مودلغزشی سریع برای همزمان‌سازی زمان محدود سیستم فوق آشوبی معرفی نموده و پایداری کنترل‌کننده جدید را با استفاده از تئوری لیاپانوف اثبات نمودیم. نشان دادیم با اعمال اغتشاش و نامعینی به سیستم، کنترل‌کننده جدید دارای ویژگی‌های همگرایی زمان محدود است. سرانجام، مقایسه‌ای بین کنترل‌کننده جدید طراحی‌شده با کنترل‌کننده مشابه ازلحاظ زمان همگرایی انجام دادیم و اثبات کردیم کنترل‌کننده جدید، همگرایی سریع‌تری را فراهم می‌کند.

مراجع

References

[1] X. Liu, S. Qi, R. Malekain, Z. Li , "Observer-based composite adaptive dynamic terminal sliding-mode controller for nonlinear uncertain SISO systems", International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 17, no. 1, pp. 94-106, Jan. 2019 (doi: 10.1007/s12555-018-0117-7).
[2] S.J. Sheela, K.V. Suresh, D. Tandur, "Security of industrial wireless sensor networks: A review", Proceeding of the IEEE/ITACT, pp. 1-6, Bangalore, India, Dec. 2015 (doi: 10.1109/ITACT.2015.7492658).
[3] M. Wollschlaeger, T. Sauter, J. Jasperneite, "The future of industrial communication: automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0", IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 11, no. 1, pp. 17-27, March 2017 (doi: 10.1109/MIE.2017.2649104).
[4] M. Wollschlaeger, T. Sauter, J. Jasperneite, "The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry", IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 11, no. 1, pp. 17-27, March 2017 (doi: 10.1109/MIE.2017.2649104).

Archive of SID

[5] M.C. Pai, "Chaos control of uncertain time-delay chaotic systems with input dead-zone nonlinearity", Complexity, vol. 21, no. 3, pp. 13-20, Oct. 2016 (doi: org/10.1002/cplx.21611).
[6] T.M. Hoang, "A Chaos-based image cryptosystem using nonstationary dynamics of logistic map", Proceeding of the IEEE/ICTC, pp. 591-596, Jeju Island, Korea (South), Oct. 2019 (doi: 10.1109/ICTC4669-1.2019.8939826).
[7] E. Tlelo-Cuautle, C. Ramos-López, M. Sánchez-Sánchez, D. Pano-Azucena, A. Sánchez-Gaspariano, C. Núñez-Pérez, L. Camas-Anzueto, "Application of a chaotic oscillator in an autonomous mobile robot", Journal of Electrical Engineering, vol. 65, no. 3, pp. 157-162, June 2014 (doi: 10.2478/jee-2014-0024).
[8] L. Minati, H. Ito, A.Perinelli, L. Riccy, L. Faec, N. Yushimura, Y. Koike, L. Minati, "Connectivity influences on nonlinear dynamics in weakly-synchronized networks: Insights from rössler systems, electronic chaotic oscillators, model and biological neurons", IEEE Access, vol. 7, pp. 174793-174821, Dec. 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2957014).
[9] A. Zhou, S. Wang, F. Wang, "Low-complexity and robust detection for hybrid chaos communication", Proceeding of the IEEE/WCSP, pp. 1-5, Xi'an, China, Dec. 2019 (doi: 10.1109/WCSP.2019.8927976).
[10] S. Zhang, T. Gao, "A coding and substitution frame based on hyper-chaotic systems for secure communication", Nonlinear Dynamics, vol. 84, no. 2, pp. 833-849, Dec. 2016 (doi: 10.1007/s11071-015-2530-2).
[11] R. Sedivy, R. M. Mader, "Fractals, chaos, and cancer: do they coincide?", Cancer Investigation, vol. 15, no. 6, pp. 601-607, June 1997 (doi: 10.3109/07357909709047603).
[12] B. Xu, Y. Wang, L. Liu, "Twice pulse ignition boost strategy for missile guidance Based on improved particle swarm optimization algorithm", Proceeding of the IEEE/CCC, pp. 9907-9912, Wuhan, July 2018 (doi: 10.23919/ChiCC.2018.8484243).
[13] M. Sciamanna, K. A. Shore, "Physics and applications of laser diode chaos", Nature Photonics, vol. 9, no. 3, pp. 151-162, Feb. 2015 (doi: 10.1038/nphoton.2014.326).
[14] H. Dimassi, A. Loría, "Adaptive unknown-input observers-based synchronization of chaotic systems for telecommunication", IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 58, no. 4, pp. 800-812, Nov. 2010 (doi: 10.1109/TCSI.2010.2089547).
[15] O. Rossler, "An equation for hyperchaos", Physics Letters A, vol. 71, no. 2-3, pp. 155-157, April 1979 (doi: 10.1016/0375-9601(79)90150-6).
[16] E. Dong, Z. Zhang, M. Yuan, Y. Ji, X. Zhou, Z. Wang, "Ultimate boundary estimation and topological horseshoe analysis on a parallel 4D hyperchaotic system with any number of attractors and its multi-scroll", Nonlinear Dynamics, vol. 95, no. 4, pp. 3219-3236, March 2019 (doi: 10.1007/s11071-018-04751-3).
[17] A. Hajipour, M. Hajipour, D. Baleanu, "On the adaptive sliding mode controller for a hyperchaotic fractional-order financial system", Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, vol. 497, pp. 139-153, May 2018 (doi: 10.1016/j.physa.2018.01.019).
[18] C. Zhou, C. Yang, D. Xu, C.-Y. Chen, "Dynamic analysis and finite-time synchronization of a new hyperchaotic system with coexisting attractors", IEEE Access, vol. 7, pp. 52896-52902, April 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2911486).
[19] F. F. Franco, E. L. Rempel, P. R. Muñoz, "Crisis and hyperchaos in a simplified model of magnetoconvection", Physica D: Nonlinear Phenomena, Article Number: 132417, May 2020 (doi: 10.1016/j.physd.2020.132417).
[20] G. Leutcho, J. Kengne, L. K. Kengne, "Dynamical analysis of a novel autonomous 4-D hyperjerk circuit with hyperbolic sine nonlinearity: Chaos, antimonotonicity and a plethora of coexisting attractors", Chaos, Solitons & Fractals, vol. 107, pp. 67-87, Feb. 2018 (doi: 10.1016/j.chaos.2017.12.008).
[21] Z. T. Njitacke, J. Kengne, H. Fotsin, "Coexistence of multiple stable states and bursting oscillations in a 4D Hopfield neural network", Circuits, Systems, and Signal Processing, vol. 39, pp. 3424-3444, Jan. 2020 (doi: org/10.1002/cplx.21611).
[22] W. Tai, Q. Teng, Y. Zhou, J. Zhou, Z. Wang, "Chaos synchronization of stochastic reaction-diffusion time-delay neural networks via non-fragile output-feedback control", Applied Mathematics and Computation, vol. 354, pp. 115-127, Aug. 2019 (doi: 10.1016/j.amc.2019.02.028).
[23] T. Wang, D. Wang, K. Wu, "Chaotic adaptive synchronization control and application in chaotic secure communication for industrial Internet of Things", IEEE Access, vol. 6, pp. 8584-8590, Jan. 2018 (doi: 10.1109/ACCESS.2018.2797979).
[24] L. Wang, M. Ding, "Dynamical analysis and passive control of a new 4D chaotic system with multiple attractors", Modern Physics Letters B, vol. 32, no. 22, Article Number: 1850260, Dec. 2018 (doi: 10.1142-/S0217984918502603).
[25] K. Rajagopal, H. Jahanbakhshi, M. Varan, I. Bayir, V. Pham, S. Jafari, A. Kartikian, "A hyperchaotic memristor oscillator with fuzzy based chaos control and LQR based chaos synchronization", AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 94, pp. 55-68, Jan. 2018 (doi: 10.1016/j.aeue.2018.06.043).

www.SID.ir

[26] M.M. Zirkohi, "Chaos synchronization using higher-order adaptive PID controller", AEU-International Journal of Electronics and Communications, vol. 94, pp. 157-167, Sep. 2018 (doi: 10.1016/j.aeue.2018.07.0-05).

[27] S. Vaidyanathan, S. T. Kingni, A. Sambas, M. A. Mohamed, M. Mamat, "A new chaotic jerk system with three nonlinearities and synchronization via adaptive backstepping control", International Journal of Engine-ering and Technology, vol. 7, no. 3, pp. 1936-1943, Dec. 2018 (doi: 10.14419/ijet.v7i3.15378).

[28] C. Huang, L. Cai, J. Cao, "Linear control for synchronization of a fractional-order time-delayed chaotic financial system", Chaos, Solitons & Fractals, vol. 113, pp. 326-332, Aug. 2018 (doi: 10.1016/j.chaos.20-18.05.022).

[29] M.-H. Wang, S.-D. Lu, M.-J. Hsieh, "Application of extension neural network algorithm and chaos synchronization detection method to partial discharge diagnosis of power capacitor", Measurement, vol. 129, pp. 227-235, Dec. 2018 (doi: 10.1016/j.measurement.2018.07.022).

[30] A. Mohammadzadeh, S. Ghaemi, O. Kaynak, "Robust predictive synchronization of uncertain fractional-order time-delayed chaotic systems", Soft Computing, vol. 23, no. 16, pp. 6883-6898, June 2019 (doi: 10.1002/cplx.21611).

[31] Y. Yin, F. Liu, P. Shi, "Finite-time continuous gain-scheduled control on stochastic hyperchaotic systems", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, vol. 224, no. 6, pp. 679-688, Sept. 2010 (doi: 10.1243/09596518JSCE971).

[32] E. D. Dongmo, K. S. Ojo, P. Woafo, A. N. Njah, "Difference synchronization of identical and nonidentical chaotic and hyperchaotic systems of different orders using active backstepping design", Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, vol. 13, no. 5, April 2018 (doi: 10.1115/1.4039626).

[33] S. Vaidyanathan, L. G. Dolvis, K. Jacques, C.-H. Lien, A. Sambas, "A new five-dimensional four-wing hyperchaotic system with hidden attractor, its electronic circuit realisation and synchronisation via integral sliding mode control", International Journal of Modelling, Identification and Control, vol. 32, no. 1, pp. 30-45, June 2019 (doi: 10.1504/IJMIC.2019.101959).

[34] A. Modiri, S. Mobayen, "Adaptive terminal sliding mode control scheme for synchronization of fractional-order uncertain chaotic systems", ISA Transactions, vol. 105, pp. 33-50, Oct. 2020 (doi: 10.1016/j.isatra.2-020.05.039).

[35] S. Mobayen, S. Javadi, "Disturbance observer and finite-time tracker design of disturbed third-order nonholonomic systems using terminal sliding mode", Journal of Vibration and Control, vol. 23, no. 2, pp. 181-189, April 2017 (doi: 10.1177/1077546315576611).

[36] S. Mobayen, "An adaptive chattering-free PID sliding mode control based on dynamic sliding manifolds for a class of uncertain nonlinear systems", Nonlinear Dynamics, vol. 82, no. 1-2, pp. 53-60, May 2015 (doi: 10.1007/s11071-015-2137-7).

[37] P.A. Hosseinabadi, A.S.S. Abadi, S. Mekhilef, H.R. Pota, "Chattering-free trajectory tracking robust predefined-time sliding mode control for a remotely operated vehicle", Journal of Control, Automation and Electrical Systems, pp. 1-19, May 2020 (doi: 10.1007/s40313-020-00599-4).

[38] M. Zak, "Terminal attractors for addressable memory in neural networks", Physics Letters A, vol. 133, no. 1, pp. 18-22, Oct. 1988 (doi: 10.1016/0375-9601(88)90728-1).

[39] X. Tong, Y. Liu, M. Zhang, H. Xu, Z. Wang, "An image encryption scheme based on hyperchaotic Rabinovich and exponential chaos maps", Entropy, vol. 17, no. 1, pp. 181-196, Dec. 2015 (doi: 10.339-0/e17010181).

[40] P.D.K. Kuate, Q. Lai, H. Fotsin, "Complex behaviors in a new 4D memristive hyperchaotic system without equilibrium and its microcontroller-based implementation", The European Physical Journal Special Topics, vol. 228, no. 10, pp. 2171-2184, Oct. 2019 (doi: 10.1140/epjst/e2019-900032-5).

[41] F. Nazarimehr, K. Rajagopal, J. Kengne, S. Jafari, V.T. Pham, "A new four-dimensional system containing chaotic or hyper-chaotic attractors with no equilibrium, a line of equilibria and unstable equilibria", Chaos, Solitons & Fractals, vol. 111, pp. 108-118, May 2018 (doi: 10.1016/j.chaos.2018.04.009).

[42] V. Van Huynh, A.J. M. Khalaf, A. Alsaedi, T. Hayat, H.R. Abdolmohammadi, "A new memristive chaotic flow with a line of equilibria", The European Physical Journal Special Topics, vol. 228, no. 10, pp. 2339-2349, Oct. 2019 (doi: 10.11140/cplx.900055-9)

[43] K. Sun, X. Liu, C. Zhu, J. Sprott, "Hyperchaos and hyperchaos control of the sinusoidally forced simplified Lorenz system", Nonlinear Dynamics, vol. 69, no. 3, pp. 1383-1391, Feb. 2012 (doi: 10.1002/cplx.012-03540)

[44] S. T. Tchinda, G. Mpame, A.N. Takougang, V.K. Tamba, "Dynamic analysis of a snap oscillator based on a unique diode nonlinearity effect, offset boosting control and sliding mode control design for global chaos synchronization", Journal of Control, Automation and Electrical Systems, vol. 30, no. 6, pp. 970-984, Sept. 2019 (doi: 10.1007/s40313-019-00518-2).

[45] J. Kengne, G. D. Leutcho, A. N. K. Telem, "Reversals of period doubling, coexisting multiple attractors, and offset boosting in a novel memristive diode bridge-based hyperjerk circuit", Analog Integrated Circuits and Signal Processing, vol. 101, no. 3, pp. 379-399, Dec. 2019 (doi: 10.1007/s10470-018-1372-5).
[46] A. Jeevarekha, S. Sabarathinam, K. Thamilmaran, P. Philominathan, "Analysis of 4D autonomous system with volume-expanding phase space", Nonlinear Dynamics, vol. 84, no. 4, pp. 2273-2284, Feb. 2016 (doi: 10.1007/s11071-016-2644-1).
[47] Z. Njitacke, J. Kengne, T.F. Fozin, B. Leutcha, H. Fotsin, "Dynamical analysis of a novel 4-neurons based Hopfield neural network: Emergences of antimonotonicity and coexistence of multiple stable states", International Journal of Dynamics and Control, vol. 7, no. 3, pp. 823-841, Dec. 2019 (doi: 10.1007/s40435-019-00509-w).
[48] V.F. Signing, J. Kengne, "Reversal of period-doubling and extreme multistability in a novel 4D chaotic system with hyperbolic cosine nonlinearity", International Journal of Dynamics and Control, vol. 7, no. 2, pp. 439-451, June 2019 (doi: 10.1007/s40435-018-0452-9).
[49] M. Chen, M. Sun, B. Bao, H. Wu, Q. Xu, J. Wang, "Controlling extreme multistability of memristor emulator-based dynamical circuit in flux–charge domain", Nonlinear Dynamics, vol. 91, no. 2, pp. 1395-1412, Nov. 2018 (doi: 10.1007/s11071-017-3952-9).
[50] X. Zhang, H. Zhu, H. Yao, "Analysis of a new three-dimensional chaotic system", Nonlinear Dynamics, vol. 67, no. 1, pp. 335-343, March 2012 (doi: 10.1007/s11071-011-9981-x).
[51] P. Frederickson, J.L. Kaplan, E.D. Yorke, J.A. Yorke, "The Liapunov dimension of strange attractors", Journal of Differential Equations, vol. 49, no. 2, pp. 185-207, Aug. 1983 (doi: 10.1016/0022-0396(83)9001-1-6).
[52] G. Qi, M.A. Wyk, B.J. Wyk, G. Chen, "On a new hyperchaotic system", Physics Letters A, vol. 372, no. 2, pp. 124-136, Jan. 2008 (doi: 10.1016/j.physleta.2007.10.082).
[53] F.Y. Dalkiran, J.C. Sprott, "Simple chaotic hyperjerk system", International Journal of Bifurcation and Chaos, vol. 26, no. 11, p. 1650189, Dec. 2016 (doi: 10.1142/S0218127416501893).
[54] C. Li, J.C. Sprott, W. Thio, H. Zhu, "A new piecewise linear hyperchaotic circuit", IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 61, no. 12, pp. 977-981, Sept. 2014 (doi: 10.1109/TCSII.2014.2356912).
[55] S. Vaidyanathan, "Analysis, adaptive control and synchronization of a novel 4-D hyperchaotic hyperjerk system via backstepping control method", Archives of Control Sciences, vol. 26, no. 3, pp. 311-338, Jan. 2016 (doi: 10.1515/acsc-2016-0018).
[56] S. Zhang, Y. C. Zeng, Z. Jun Li, "A novel four-dimensional no-equilibrium hyper-chaotic system with grid multiwing hyper-chaotic hidden attractors", Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, vol. 13, no. 9, Sept. 2018 (foi: 10.1115/1.4039980).
[57] S. Vaidyanathan, "Analysis, control and synchronization of a novel 4-D highly hyperchaotic system with hidden attractors", Advances in Chaos Theory and Intelligent Control: Springer, pp. 529-552, April 2016 (doi: 10.1007/978-3-319-30340-6_22).
[58] H. Lin, C. Wang, Y. Tan, "Hidden extreme multistability with hyperchaos and transient chaos in a Hopfield neural network affected by electromagnetic radiation", Nonlinear Dynamics, vol. 99, no. 3, pp. 2369-2386, Dec. 2020 (doi: 10.1007/s11071-019-05408-5).
[59] E.E. Mahmoud, "Dynamics and synchronization of new hyperchaotic complex Lorenz system", Mathematical and Computer Modelling, vol. 55, no. 7-8, pp. 1951-1962, April 2012 (doi: 10.1016/j.mcm.2-011.11.053).
[60] M. Steinberger, M. Horn, L. Fridman, "Variable-Structure Systems and Sliding-Mode Control", ed: Springer, 2020 (ISBN: 978-3-030-36621-6).
[61] A. Abdurahman, H. Jiang, Z. Teng, "Finite-time synchronization for memristor-based neural networks with time-varying delays", Neural Networks, vol. 69, pp. 20-28, Sept. 2015 (doi: 10.1016/j.neunet.2015.04.015).
[62] C. Li, F. Zhang, "A survey on the stability of fractional differential equations", The European Physical Journal Special Topics, vol. 193, no. 1, pp. 27-47, April 2011 (doi: 10.1140/epjst/e2011-01379-1).
[63] X. Yu, M. Zhihong, "Fast terminal sliding-mode control design for nonlinear dynamical systems", IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, vol. 49, no. 2, pp. 261-264, Aug. 2002 (doi: 10.1109/81.983876).
[64] X. Liu, S. Qi, R. Malekain, Z. Li, "Observer-based composite adaptive dynamic terminal sliding-mode controller for nonlinear uncertain SISO systems", International Journal of Control, Automation and Systems, vol. 17, no. 1, pp. 94-106, January 2019 (doi: 10.1007/s12555-018-0117-7).
[65] H. Bouslehi, H. Seddik, "A new rapid hyperchaotic system for more efficient 2D data encryption", Multimedia Tools and Applications, vol. 77, no. 6, pp. 7741-7762, May 2018 (doi: 10.1007/s11042-017-4675-0).

www.SID.ir

Archive of SID

زیرنویس‌ها

1. Positive Lyapunov exponent
2. Bifurcation diagram
3. Lyapunov spectrum
4. Output feedback control
5. Adaptive control
6. Passive control
7. Optimal control
8. PID control
9. Adaptive back-stepping control
10. Linear control
11. Neural network
12. Predictive control
13. Stochastic control
14. Back-stepping design
15. Sliding mode control
16. Terminal sliding mode control
17. Chattering
18. Hyperbolic function
19. Exponential function
20. Chaotic attractors
21. Frequency spectrum
22. Equilibrium points
23. Kaplan-Yorke dimension
24. Eigenvalues
25. Poincare map
26. Divergence
27. Periodic
28. Guasi-periodic
29. Sliding surface
30. Reference model
31. Tracking errors

www.SID.ir