Sahand University of Technology

DOR: 20.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9

Journal of Nonlinear Systems in Electrical Engineering

Vol. 13, No. 1

Spring and Summer 2026

ISSN: 2322 – 3146

http:// jnsee.sut.ac.ir

Synchronization of Variable Chaotic Networks using the Fuzzy Modelling based on Impulsive Control

Reza Behinfaraz [1]*, Amir Aminzadeh Ghavifekr [2]

[1] Faculty of electrical and computer engineering, Urmia university, Urmia, Iran

[2] Faculty of electrical and computer engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

* Corresponding author email: r.behinfaraz@urmia.ac.ir

Abstract

In this paper syncronization of chaotic networks based on impuslive structure is studied. Most of the studies on time-varying networks are based on the time-varying topology of the network. Time-varying dynamics in the nodes of networks is a new topic in this field. In this paper, time-varying conditions are considered on the topology of networks and dynamics of each node of networks simultaneously. Chaotic networks are one of the most applicable networks in real-world applications. In these networks, the dynamic of each node is a chaotic dynamic. Considering time variation in chaotic dynamics is a challenging problem that has been studied in this paper. This synchronization is done using impulsive control theory. According to the complex structure of networks we use fuzzy logic to simplify systems to design controllers. Simulation example has been verified the performance of the proposed method in this paper.

Keywords

Complex network;Chaotic system; Impulsive control; Chaotic system

1. Short Introduction

Synchronization of chaotic networks has attracted significant attention due to its wide applications in engineering and science. In recent years, time-varying networks have become an important research topic because of their ability to model real-world dynamic systems. However, achieving synchronization in such networks is challenging, especially in the presence of time delays and structural uncertainties. Most existing studies assume fixed network structures and neglect the combined effects of dynamic topology and delays. Therefore, developing effective control strategies for synchronization of time-varying chaotic networks remains an open and important problem.

2. Proposed Work

The model classifies dermoscopic images into melanoma and benign classes and is evaluated using accuracy, precision, recall, F1-score, ROC-AUC, PR-AUC, balanced accuracy, and MCC.
In this paper, a novel approach based on fuzzy-impulsive control is proposed for the synchronization of time-varying chaotic networks. A suitable controller is designed using fuzzy system techniques to handle system nonlinearities and uncertainties. The proposed method considers both the dynamic behavior and the time-varying structure of the network. In addition, the effects of time delays and uncertain topology are incorporated into the model. This integrated framework provides a more realistic and effective solution compared to previous works.

3. Conclusion

In this paper, the problem of synchronization of time-varying chaotic networks using a fuzzy impulsive control approach is investigated. A novel framework is proposed in this context. Based on a fuzzy system approach, an appropriate controller is designed to achieve synchronization. Furthermore, a time-varying network structure is taken into account. Considering both dynamic variations and structural uncertainties for the synchronization of networks with time delays and uncertain topologies represents an aspect that has not been previously addressed.

همزمان‌سازی شبکه‌های آشوبناک متغیر با مدل‌سازی فازی مبتنی بر کنترل ضربه‌ای

رضا بهین فراز[1*]، امیرامین زاده قوی فکر[2]

[1] استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

[2] استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز،تبریز، ایران

* آدرس پست الکترونیکی نویسنده مسئول: r.behinfaraz@urmia.ac.ir

DOR: 20.1001.1.23223146.1401.9.2.2.0

نشریه سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۱۳ - شماره ۱

بهار و تابستان ۱۴۰۵

صفحات ۱ الی ۱۸

ISSN: 2322-3146

http:// jnsee.sut.ac.ir

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۳/۱۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۰

چکیده

در این مقاله همزمان‌سازی شبکه‌های آشوبناک متغیر با زمان مطرح گردیده است. تغییرپذیری شبکه‌ها، یکی از موارد معمول در شبکه‌های موجود بوده که موجب پیچیدگی می‌شود. ازاین رو مطالعه بر روی شبکه‌های تغییرپذیر با زمان دارای اهمیت است. مطالعه بر روی شبکه‌ها با تغییرپذیری دینامیک هر کدام از در این مقاله مورد مطالعه قرار می‌گیرد. تغییرپذیری در دینامیک گره‌ها را می‌توان به تغییرپذیری در پارامتر و همچنین تغییرپذیری درتاخیر زمانی تقسیم‌بندی نمود. بررسی شبکه‌ها با درنظر گرفتن هردو نوع تغییرات در این مقاله انجام پذیرفته است. در این مقاله، همزمان‌سازی مابین دو شبکه آشوبناک متغیر با زمان بررسی می‌گردد. تغییرات در نظرگرفته شده در گراف شبکه‌ها در حالتی که دو شبکه متفاوت از همدیگر است بررسی می‌گردد. همزمان‌سازی خارجی انجام‌یافته در این مقاله نیز با استفاده از کنترل ضربه‌ای انجام می‌پذیرد. لذا اساس کار در این مقاله تلفیق کنترل ضربه‌ای با ساختار فازی در دو رویکرد است. نتایج شبیه‌سازی کارآمدی روش پیشنهادی را تایید می‌کند.

واژه‌های کلیدی

همزمان‌سازی

شبکه‌های متغیر با زمان

کنترل ضربه‌ای

سیستم آشوب

کنترل فازی

۱- مقدمه

در طول یک دهه اخیر، مفهوم شبکه در زمینه‌های متنوعی همچون شبکه‌های اجتماعی، شبکه‌های زیستی، بازاریابی جهانی و شبکه‌های مخابراتی مورد بررسی بیشتر قرار گرفته است [۱]. در اکثر شبکه‌های موجود، هر کدام از گره‌ها دارای دینامیک می‌باشند که در برخی اوقات این دینامیک‌ها به‌صورت آشوبناک پدیدار می‌شوند. نظریه گراف یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها برای مدل‌سازی شبکه می‌باشد. در این نظریه یک شبکه با استفاده از تعدادی گره و یال نمایش داده می‌شود [۲].

رویدادهای آشوبناک زیادی در دهه‌های اخیر کشف شده و مسائل مختلفی روی این پدیده‌ها بررسی شده است. امروزه مهندسین و دانشمندان قبول کرده‌اند که آشوب، پدیده‌ای عادی در زمینه‌های فیزیک، شیمی، ریاضیات، زیست‌شناسی و اقتصاد در دنیای امروز است. آشوب برای مدت زمان طولانی پدیده‌ای دشوار برای کنترل در نظرگرفته می‌شد که به‌همین دلیل به‌شدت از وقوع آن جلوگیری می‌شد. اصلی‌ترین ویژگی آشوب که آن را از سامانه‌های غیرآشوبناک متمایز می‌کند حساسیت به شرایط اولیه در سامانه است. این ویژگی موجب می‌شود که در صورت نیاز به کنترل این‌گونه از سامانه‌ها، باید مقدار دقیق سیگنال اندازه‌گیری شود. در دهه‌ی ۱۹۹۰ کارهایی توسط Chen و Pecora انجام شد که موجب تغییر در راستای استفاده از سیگنال آشوب شد. از آن زمان، دو زمینه پایداری سیگنال آشوب و همزمان‌سازی آشوب مورد توجه بسیاری قرار گرفت. سیستم‌های همزمان با پیدایش دینامیک‌های دارای رابطه متقابل اهمیت زیادی پیدا کرده است. فرایند همزمان‌سازی به‌عنوان پدیده‌ای که در تمام زندگی بشری مشهود است نقش مهمی در مفاهیم متفاوت از جمله هواشناسی، تکنولوژی، زیست‌شناسی و حتی هنر [۳] ایفا می‌کند. تلاش برای همزمان‌سازی گروه موسیقی را یکی از بدیهی‌ترین نمودهای همزمان‌سازی در روابط انسانی می‌توان نام برد. در بین تمام تلاش‌هایی که برای شرح پدیده همزمان‌سازی انجام شده است چند تحقیق وجود دارد که می‌تواند دید ما را بهبود ببخشد. Weiner در کتاب خود به این مساله پرداخته است که چگونه به‌صورت همزمان هزاران عصب کاری را بدون داشتن رهبر انجام می‌دهند. در این کتاب اصول ریاضی چندانی برای این مفهوم بیان نشده است ولی با این وجود Winfree به بررسی دینامیک‌های غیرخطی که دارای تعامل متقابل ضعیفی هستند پرداخته است [۴].

مفهوم همزمان‌سازی، تعریف مشخصی در شبکه‌ها ندارد و بر حسب نیاز تعریفی برای دینامیک خطای همزمان‌سازی بیان می‌شود. به‌عنوان مثال همزمان‌سازی داخلی در [۵ و ۶] و همزمان‌سازی خارجی در [۷ و ۸ و ۹] نمونه‌های از تفاوت در تعریف خطای همزمان‌سازی می‌باشند. استفاده از روش کنترل ضربه‌ای با توجه به ویژگی‌های این روش، یک مورد کاربردی در همزمان‌سازی شبکه‌ها است.

روش کنترل ضربه‌ای، یک روش گسسته بر اساس معادلات دیفرانسیل ضربه‌ای می‌باشد. این روش یکی از موثرترین روش‌ها برای همزمان‌سازی دینامیک‌های غیرخطی و شبکه‌های پیچیده همراه با نامعینی می‌باشد. در این روش، شبکه پاسخ در لحظات ضربه، ضربه‌های کوچکی از شبکه راه‌انداز دریافت می‌کند که به صورت قابل توجهی میزان پهنای باند مورد نظر را با کم کردن اطلاعات انتقالی کاهش می‌دهد. این ویژگی یکی از برجسته‌ترین دلایل برای استفاده از روش کنترل ضربه‌ای می‌باشد که این روش را از روش‌های دیگر متمایز می‌سازد. مفهوم کنترل ضربه‌ای و اصول ریاضی آن که به نام معادلات دیفرانسیل ضربه‌ای شناخته می‌شوند دارای تاریخچه‌ی قدیمی است. در حقیقت در سیستم‌های مکانیکی، پدیده‌های ضربه‌ای به مدت طولانی تحت عنوان‌هایی همچون سیستم‌های مکانیکی همراه با ضربه بررسی و مطالعه شده است. روش‌های کنترل ضربه‌ای فراوانی به شکل کنترل بهینه با موفقیت پیشرفت داده شده که به نام کنترل ضربه‌ای شناخته می‌شود [۱۰]. در طول چند سال اخیر، روش کنترل ضربه‌ای به‌دلیل بازدهی بهتر مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۱۳].

Preprint

در تلفیق بحث کنترل ضربه‌ای با فازی نیز پژوهش‌هایی انجام یافته است. این پژوهش‌ها بیشتر به کنترل و همزمانی در سیستم‌های آشوب به‌کار رفته و در ساختار شبکه مورد توجه قرار نگرفته است. به عنوان مثال در مرجع [۱۴] کنترل سیستم آشوب مبتنی بر مدل فازی TS انجام یافته است. به این منظور مدل TS فازی از یک سیستم آشوب به‌دست آمده و پس از آن به طراحی کنترل‌کننده ضربه‌ای با استفاده از ساختار TS پرداخته شده است. نشان داده شده است با انتخاب قوانین مناسب جهت فازی‌سازی و سپس استفاده از قواعد کنترل ضربه‌ای می‌توان بازه مناسب برای کنترل سیستم آشوب را به‌دست آورد.

در مرجع [۱۵] کنترل فازی ضربه‌ای یک سیستم با تضمین هزینه انجام یافته است. در این مرجع نیز ابتدا سیستم غیرخطی توسط قوانین فازی تبدیل به مدل TS فازی شده و پس از آن کنترل ضربه‌ای بر مدل فازی سیستم اعمال می‌گردد. همچنین با تعریف یک تابع هزینه قانون کنترلی به نحوی به دست می‌آید که کمترین هزینه حاصل شود. این کار با بهینه‌سازی نامساوی ماتریسی به‌دست می‌آید. با بررسی انجام یافته در این مرجع می‌توان به این نتیجه رسید که کار بر روی پارامترهای کنترل‌کننده ضربه‌ای می‌تواند موجب بهبود بیشتر پاسخ گردد.

تحقیقات انجام‌یافته در زمینه همزمان‌سازی شبکه‌های تغییرپذیر با زمان بیشتر محدود به همزمان‌سازی داخلی در یک شبکه می‌شود و همزمان‌سازی خارجی از مواردی است که بیشتر باید مورد توجه بگیرد [۱۹-۱۶]. به‌ویژه این امر در حالتی که دو شبکه متفاوت از هم باشند چالش‌برانگیزتر می‌گردد. بنابراین در این مقاله نیز همزمان‌سازی شبکه‌ها مورد بحث قرار خواهد گرفت.

مهمترین نقاط کلیدی در این مقاله که آن را از کارهای پیشین متمایز می‌کند به شرح زیر است:

- ارائه روشی نوین برای همزمان‌سازی شبکه‌های آشوبناک با استفاده از کنترل ضربه‌ای
- ارائه راهکاری برای غلبه بر تغییرپذیری در دینامیک گره‌ها در همزمان‌سازی شبکه‌های آشوبناک با استفاده از روش فازی
- ارائه راهکاری برای غلبه بر تغیرپذیری ساختار شبکه‌ها در همزمان‌سازی شبکه‌های آشوبناک با استفاده از روش فازی-ضربه‌ای
- ارائه راهکاری برای ایجاد همزمان‌سازی خارجی مابین دو شبکه متفاوت با تفاوت در دینامیک‌ها و ساختارها

این مقاله به صورت زیر بخش‌بندی شده است.

در قسمت ۲ به تعاریف اولیه در حوزه مساله موزد بررسی می‌پردازیم. بخش ۳ به شیوه و روش‌های مورد نیاز برای بحث همزمان‌سازی شبکه‌های متغیر با زمان خواهد پرداخت. در قسمت ۴ نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با روش‌های موجود انجام یافته و نهایتا در بخش ۵ نتایج اصلی این مقاله ارایه گردیده است.

۲- تعاریف اولیه

۲-۱- ساختار شبکه

در حالت کلی معادلات یک شبکه را می‌توان به‌فرم زیر نمایش داد [۱۶]:

$$\dot{x}_i(t) = f\big(x_i(t)\big) + \epsilon \sum_{j=1}^{n} c_{ij}\, \Gamma x_j(t) \qquad (۱)$$

در معادله (۱) $x_i(t) = \left(x_{(I,1)}(t), x_{(I,2)}(t), \ldots, x_{(I,n)}(t)\right) \in R^n$ نشان‌دهنده بردار متشکل از حالت هر یک از گره‌های شبکه، ϵ قدرت اتصال، ماتریس $\Gamma \in R^{n\times n}$ نشان‌دهنده ماتریس تزویج داخلی و $C = (c_{ij}) \in Z^{n\times n}$ نمایش‌دهنده ماتریس متقارن تزویج خارجی است که به این صورت تعریف می‌شود. اگر ارتباطی بین گره i و j موجود باشد در آن‌صورت $c_{ij} = c_{ji} > 0$ و در غیراین‌صورت، $c_{ij} = c_{ji} = 0$. همچنین عناصر قطر اصلی ماتریس C نیز طبق رابطه (۱) تعریف می‌شوند:

$$c_{ii} = -\sum_{j=1, j\neq i}^{n} c_{ij}, \ i \in N \qquad (۲)$$

۲-۲- شبکه متغیر با زمان

شبکه‌های متغیر با زمان را می‌توان به‌صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

- تغییرپذیری در گراف شبکه با زمان
- تغییرپذیری در دینامیک‌های هر گره از شبکه با زمان

در مورد گراف متغیر با زمان هر کدام از ماتریس‌های تزویج داخلی یا خارجی یا هر دو را می‌توان یک ماتریس متغیر با زمان در نظر گرفت. این نکته باید مورد توجه باشد که شروط مطرح‌شده برای ماتریس تزویج خارجی بایستی در تمامی زمان‌ها برقرار باشد.

۲-۳- همزمان‌سازی در شبکه‌ها

دو حالت کلی از همزمان‌سازی را با توجه به تفاوت ساختار در شبکه‌های آشوبناک می‌توان در نظر گرفت:

- همزمان‌سازی داخلی

شبکه (۱) به همزمانی داخلی رسیده است اگر به‌ازای $t \to \infty$:

$$x_1(t) = x_2(t) = \cdots = x_n(t) = s(t) \qquad (۳)$$

باشد که $s(t)$ جواب گره ایزوله نامی زیر است:

$$\dot{s}(t) = f(t)$$

- همزمان‌سازی خارجی

در این حالت، دو شبکه آشوبناک همزمان‌سازی می‌شود. شبکه راه‌انداز را به‌صورت شبکه (۱) در نظر گرفته و شبکه پاسخ طبق رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\dot{y}_i(t) = f\left(y_i(t)\right) + \epsilon \sum_{j=1}^{n} c_{ij}\Gamma y_j(t) + u_i(t) \qquad (۴)$$

که $y_i(t) = \left(y_{(i,1)}(t), y_{(i,2)}(t), \ldots, y_{(i,n)}(t)\right) \in R^n$ نشان‌دهنده بردار حالت هر گره از شبکه راه‌انداز و $u_i(t)$ کنترل‌کننده‌هایی برای $i = 1,2,\ldots,n$ است که برای رسیدن به همزمانی طراحی می‌شود. در این حالت خطای همزمان‌سازی خارجی طبق رابطه (۵) تعریف می‌شود:

PrePrint

$$e_i(t) = y_i(t) - x_i(t) \quad (۵)$$

هدف نهایی طراحی کنترل‌کننده‌های موجود در (۴) به نحوی است که همگرایی (۵) به صفر تضمین گردد.

٤-۲- کنترل ضربه‌ای

کنترل ضربه‌ای کنترلی است که بر پایه معادلات دیفرانسیلی ضربه‌ای شکل گرفته است. در سیستم کنترل ضربه‌ای، باید حداقل یک متغیر حالت که به صورت ضربه‌ای تغییر می‌کند وجود داشته باشد.

سیستم غیرخطی را همانند رابطه (۶) در نظر بگیرید:

$$\dot{x} = f(x,t) \quad (۶)$$

که در آن f پیوسته می‌باشد. مجموعه زمان‌های ضربه به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$0 < \tau_1 < \tau_2 < \cdots < \tau_i < \tau_{(i+1)} < \cdots, \tau_i \to \infty,\ i \to \infty$$

اگر رابطه (۷) برقرار باشد:

$$\Delta x|_{(t=\tau_i)} = x(\tau_i^+) - x(\tau_i^-) \quad (۷)$$

Δx پرش تعریف می‌شود که در زمان‌های ضربه به متغیرهای حالت اعمال می‌شود. در نتیجه سیستم ضربه‌ای به‌صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود.

$$\dot{x} = f(x,t), t \neq \tau_i, \Delta x = x(\tau_i^+) - x(\tau_i^-), t = \tau_i \quad (۸)$$

رابطه (۸) به‌عنوان معادله‌ی دیفرانسیل ضربه‌ای شناخته می‌شود. به‌صورت کلی سیستم کنترل ضربه‌ای به صورت مدل (۹) نشان داده می‌شود:

$$\dot{x} = f(x,t),\ t \neq \tau_{k\backslash \Delta x} = u(x,t),\ t = \tau_k \quad (۹)$$

در مدل (۹) x متغیرهای حالت سیستم هستند. $u(x,t)$ قانون کنترل ضربه‌ای است. در این نوع از سیستم، ورودی کنترل به‌صورت پرش‌های ناگهانی در برخی از متغیرهای حالت سیستم ایفای نقش می‌کند.

۳- موارد و روش‌ها

۳-۱- کنترل فازی ضربه‌ای با رویکرد سیستمی

مدل‌سازی انواع سیستم‌های غیرخطی توسط منطق فازی روزبه‌روز در حال افزایش است. نشان داده شده که مدل T-S فازی می‌تواند به‌سادگی تقریب قابل‌قبولی از هر سیستم غیرخطی را برآورده کند [۱۴].

PrePrint

سیستم کلی ترکیب سیستم‌های خطی محلی است. یک مدل کلی TS فازی به‌صورت رابطه (۱۰) توصیف می‌شود:

$$Rule_i:\ IF\ z_1(t)\ is\ M_{i1}\ and\ ,\ \dots,\ and\ z_p(t)\ is\ M_{ip}THEN\dot{x} = A_i x(t) + u(t) \quad (۱۰)$$

که M_{ij} به ازای $j = 1,2,\dots,p$ مجموعه‌های فازی، r تعداد قوانین، $x(t)$ بردار حالت، $u(t)$ بردار ورودی و A_i و $z_j(t)$ به ازای j=1,...,p متغیرهای فرضی است. هر تالی معادله خطی به فرم $A_i x(t) + u(t)$ ، یک زیرسیستم نامیده می‌شود. با استفاده از فازی‌کننده۱ سینگلتون، استنتاج فازی ضرب و غیرفازی‌ساز میانگین وزن‌دار، خروجی نهایی سیستم فازی به‌صورت زابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$\dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^{r} w_i\big(z(t)\big)\big(A_i x(t) + u_i(t)\big)}{\sum_{i=1}^{r} w_i\big(z(t)\big)} \quad (۱۱)$$

که $z(t) = (z_1(t), z_2(t), \dots, z_p(t))$ و

$$w_i\big(z(t)\big) = \prod_{j=1}^{p} M_{ij}\left(z_j(t)\right) \quad (۱۲)$$

برای تمامی t ها، $M_{ij}\big(z(t)\big)$ درجه عضویت $z_j(t)$ در M_{ij} است که شرط زیر را برآورده می کند:

$$sum_{i=1}^{r} w_i\big(z(t)\big) > 0$$

با معرفی،

$$h_i\big(z(t)\big) = w_i\big(z(t)\big) / \sum_{i=1}^{r} w_i\big(z(t)\big)$$

رابطه (۱۳) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$=\sum_{i=1}^{r} h_i\,(z(t)(A_i\,x(t) + u_i\,(t))\dot{x} \quad (۱۳)$$

قانون فازی کنترل ضربه‌ای زیر برای مدل فازی (۱۳) طبق رابطه (۱۴) تعریف می‌شود [۱۴]:

$$\text{IF } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and, ... and } z_p(t) \text{ is } M_{ip}$$
$$\text{THEN } u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \delta(t - \tau_k) B_i x(t)\,, i = 1,2,\dots,r\,,\ t = \tau_k \quad (۱۴)$$

[1] Fuzzifier

PrePrint

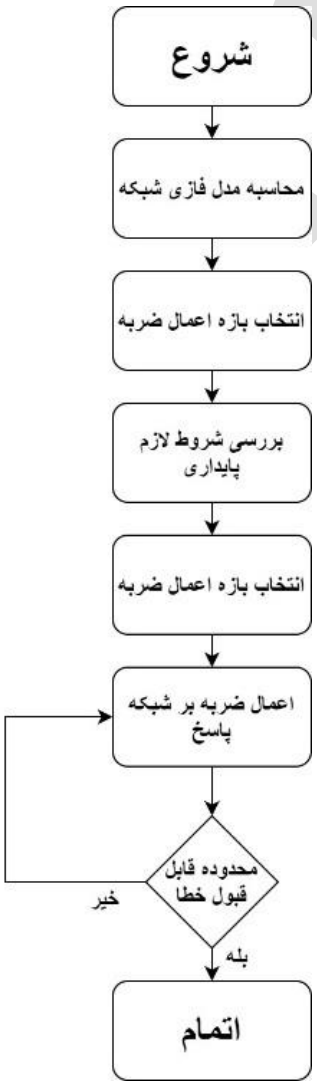
مانند قسمت قبل، با استفاده از فازی‌کننده سینگلتون، استنتاج فازی ضرب و غیرفازی‌ساز میانگین وزن‌دار، خروجی نهایی کنترل‌کننده فازی ضربه‌ای طبق رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$u(t)=\frac{\sum_{i=1}^{r} w_i\big(z(t)\big)\sum_{k=1}^{\infty}\delta(t-\tau_k)B_i x(t)}{\sum_{i=1}^{r} w_i\big(z(t)\big)} \qquad (۱۵)$$

حالت کلی کنترل فازی ضربه‌ای را می‌توان طبق رابطه (۱۶) نوشت:

$$\begin{aligned}\dot{x}&=\sum_{i=1}^{r} h_i\big(z(t)\big)A_i x(t),\ t\neq\tau_k\\ u&=\sum_{i=1}^{r} h_i\big(z(t)\big)\delta(t-\tau_k)B_i x(t),\ t=\tau_k\end{aligned} \qquad (۱۶)$$

الگوریتم روش پیشنهادی در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. فلوچارت کنترل فازی ضربه‌ای با رویکرد سیستمی

Print

۳-۲- همزمان‌سازی شبکه‌های آشوبناک با استفاده از رویکرد سیستم فازی

شبکه‌های در نظر گرفته‌شده دارای ساختار متغیر با زمان می‌باشند. همچنین دینامیک‌های هرکدام از گره‌ها دینامیک متغیر با زمان در نظر گرفته می‌شوند. هدف نهایی در این قسمت رسیدن به همزمانی مابین دو شبکه متفاوت آشوبناک متغیر با زمان با تغییرپذیری در دینامیک و همچنین ساختار شبکه است. در این بخش شبکه راه‌انداز به‌صورت رابطه (۱۷) در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{X}_i(t) = f(X_i(t)) + p\sum_{j=1}^{N} L'_{ij}(t) C X_j(t) \quad (۱۷)$$

که X_i نشان‌دهنده بردار حالت سیستم برای گره‌های $i = 1, \dots, N$ است که N تعداد گره شبکه است. همچنین j نشان‌دهنده گره جفت‌شده به‌ازای $j = 1, \dots, N$ است. $f(.)$ نشان‌دهنده دینامیک هرکدام از گره‌ها است که دینامیک متغیر با زمان در نظر گرفته خواهد شد. p قدرت تزویج است. C نشان‌دهنده ماتریس تزویج داخلی است. $L'(t)$ ماتریس تزویج خارجی است و $L'_{ij}(t)$ نشان‌دهنده المان‌های این ماتریس است. این ماتریس یک ماتریس متغیر با زمان در نظر گرفته خواهد شد. اگر لینکی بین گره i و j باشد، $L'_{ij}(t) = L'_{ji}(t) \neq 0$ در غیر اینصورت $L'_{ij} = 0$ است. همچنین برای این ماتریس، $L'_{ii}(t) = -\sum_{i=1, i\neq j}^{N} L'_{ij}(t)$ برقرار است.

شبکه پاسخ نیز به‌صورت رابطه (۱۸) در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{Y}_i(t) = f(Y_i(t)) + p\sum_{j=1}^{N} L_{ij} C Y_j(t) + u_i(t) \quad (۱۸)$$

که Y_i نشان‌دهنده بردار حالت سیستم برای گره‌های $i = 1, \dots, N$ است که N تعداد گره شبکه است. همچنین $u_i(t)$ جبران‌ساز کنترلی است. سایر پارامترهای شبکه، مشابه پارامترهای شبکه (۱۷) است.

خطای همزمانی به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود:

$$E_i = Y_i - X_i \quad (۱۹)$$

حال با استفاده از مدل فازی TS مطرح‌شده روابط (۱۷) تا (۱۹) دو شبکه راه‌انداز و پاسخ به‌صورت زیر تبدیل می‌شوند. شبکه راه‌انداز در رابطه (۲۰) نشان داده شده است.

$$\dot{X}_i(t) = q\sum_{l=1}^{N} w_l(z'(t))(A_l X_i(t)) + p\sum_{l=1}^{N} L'_{ij} C X_j \quad (۲۰)$$

شبکه پاسخ در رابطه (۲۱) نشان داده شده است:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{\mathrm{i}}(\mathrm{t}) = \mathrm{q}\sum_{l=1}^{r} w_l\left(z^{'}(t)\right)\left(A_l Y_i(t)\right) + \mathrm{p}\sum_{l=1}^{N} L_{ij}^{'} C Y_j + u_i(t)\ t \neq t_k \\ Y_i(t^{+}) - Y_{i(t^{-})} = q\sum_{l=1}^{r} w_l\left(z^{'}(t)\right)\left(B_l E_i(t)\right), t = \tau_k \end{cases} \quad (۲۱)$$

در نتیجه خطای همزمان‌سازی فازی ضربه‌ای در رابطه (۲۲) به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{\mathrm{i}}(\mathrm{t}) = \mathrm{q}\sum_{l=1}^{r} w_l\left(z^{'}(t)\right)\left(A_l Y_i(t)\right) + \mathrm{p}\sum_{l=1}^{N} L_{ij}^{'} C Y_j + u_i(t)\ t \neq t_k \\ Y_i(t^{+}) - Y_{i(t^{-})} = q\sum_{l=1}^{r} w_l\left(z(t)\right)\left(B_l E_i(t)\right), t = \tau_k \end{cases} \quad (۲۲)$$

با درنظر گرفتن معادله خطای ضربه‌ای به‌صورت (۱۹) برای رسیدن به همزمانی، جبران‌ساز کنترلی مطابق قضیه۱ طراحی و پایداری معادله خطای همزمان‌سازی اثبات می‌گردد

قضیه ۱. برای شبکه پاسخ (۱۷) و شبکه راه‌انداز (۱۸) با درنظر گرفتن:

$$u_{i(t)} = -q\sum_{l=1}^{r}\left(w_l\left(z(t)\right) - w_l(z'(t))\left(A_l X_i(t)\right)\right) - p\sum_{l=1}^{N}(L_{ij} - L'_{ij})CX_j$$

همزمانی با در نظر گرفتن شرط (۲۳) اتفاق می‌افتد:

$$0 \leq \lambda_m\left(\tau_{\{k+1\}} - \tau_k\right) \leq -\ln(\rho\lambda_k) \quad (۲۳)$$

که $\rho > 1$ می‌باشد. همچنین λ_m بزرگترین مقدار ویژه ماتریس $I_N \otimes \left(A_l + A_l^T\right) + pL \otimes (C + C^T)$ و λ_k بزرگترین مقدار ویژه ماتریس $(I + B_l)^T(I + B_l)$ است.

اثبات.

تابع لیاپانوف به‌صورت رابطه (۲۴) در نظر گرفته‌می‌شود:

$$V\left(E(t)\right) = \sum_{\{i=1\}}^{\{N\}} E_i^T(t)E_i(t) \quad (۲۴)$$

با استفاده از معادله (۲۳) می‌توان نوشت:

PrePrint

$$
\begin{aligned}
&D^{+}V \\
&= \sum_{\{i=1\}}^{\{N\}} \left(q \sum_{\{l=1\}}^{\{r\}} w_l\big(z(t)\big)\big(A_l E_{i(t)}\big) + p \sum_{\{j=1\}}^{\{N\}} L_{\{ij\}} E_{j(t)} \right)^{T} E_{i(t)} \\
&+ E_{i(t)}^{T} \left(q \sum_{\{l=1\}}^{\{r\}} w_l\big(z(t)\big)\big(A_l E_{i(t)}\big) + p \sum_{\{j=1\}}^{\{N\}} L_{\{ij\}} C\, E_{j(t)} \right) \\
&= \sum_{N}^{i=1} q \sum_{\{l=1\}}^{\{r\}} w_l\big(z(t)\big)\big(E_i^{T}(t)\big(A_l + A_l^{T}\big)E_{i(t)}\big) + p \sum_{j=1}^{N} L_{\{ij\}}\, E_j(t)(C + C^{T})E_j(t))
\end{aligned}
\tag{۲۵}
$$

$$
\begin{aligned}
&= q \sum_{l=1}^{r} w_l\,(z(t))\, E\hat{}T\,(t)\,[I_N \otimes (A_l + A_l^{T}) + pL \otimes (C + C^{T})]\, E(t) \\
&\qquad + p \sum_{j=1}^{N} L_{\{ij\}} E_j(t)(C + C^{T})E_j(t)) \\
&\qquad = q \sum_{l=1}^{r} w_l\,(z(t)E^{T}(t)[I_N \otimes (A_l + A_l^{T}) + pL \otimes (C + C^{T})]\, E(t) \\
&\qquad \le \lambda_l \;\; q \sum_{l=1}^{r} w_l\big(z(t)\big)E^{T}(t)E(t) \le |\lambda_l| E^{T}(t)E(t) = \lambda_m V
\end{aligned}
$$

که λ_l بزرگترین مقدار ویژه ماتریس برای حالت های سوییچ:

$$I_N \otimes \big(A_l + A_l^{T}\big) + pL \otimes (C + C^{T})$$

و λ_m بزرگترین مقدار λ_l است. این شرط رابطه (۲۳) را برای $t \neq \tau_k$ برآورده می کند. همچنین:

$$
\begin{aligned}
V(E + \delta E) = V(E + q \sum_{l=1}^{r} w_l\big(z(t)\big)B_l\, E) \;&= V\left(q \sum_{l=1}^{N} w_l\big(z(t)\big)(I + B_l)E \right) \\
&= \sum_{i=1}^{N} E_i^{T}(t) \left(q \sum_{l=1}^{r} w_l\big(z(t)\big)(I + B_l)^{T} \right)\left(q \sum_{l=1}^{r} w_l\big(z(t)\big)(I + B_l) \right) E_i(t) \\
&= \sum_{i=1}^{N} q^2 \sum_{l,l'=1}^{r} w_l\big(z(t)\big) w_l\big(z(t)\big) E_i^{T}(t)(I + B_l)^{T}\,(I + B_l')\; E_i(t) \le \sum_{i=1}^{N} q \sum_{l=1}^{N} \lambda_k \\
&\le \sum_{l=1}^{N} q \sum_{l=1}^{r} \lambda_k\, w_l\big(z(t)\big)\, E_i^{T}(t)E_i(t) \le \lambda_k\, w_l\big(z(t)\big) E_i^{T}(t)(I + B_l)^{T}(I + B_l)E_i(t) \\
&\le \lambda_k V(E)
\end{aligned}
\tag{۲۶}
$$

در نتیجه رابطه (۲۳) برای $t = \tau_k$ برقرار می‌شود. همچنین به آسانی می‌توان نشان داد لم برای تابع لیاپانوف (۲۴) برقرار است. در نتیجه شبکه کنترل ضربه‌ای (۲۱) منجر به سیستم مقایسه زیر می گردد:

PrePrint

$$\begin{cases} \dot{e}'(t) = \lambda_m e'(t), & t \neq \tau_k \\ e'(t) = \lambda_k e'(t), & t = \tau_k \\ e'(t_0^+) = e_0' \end{cases} \quad (۲۷)$$

حال با استفاده از قضیه ۱ مبدا رابطه (۲۱) پایدار مجانبی است اگر $0 \leq \lambda_m (\tau_{k+1} - \tau_k) \leq -ln(\rho \lambda_k)$ که $\rho > 1$.

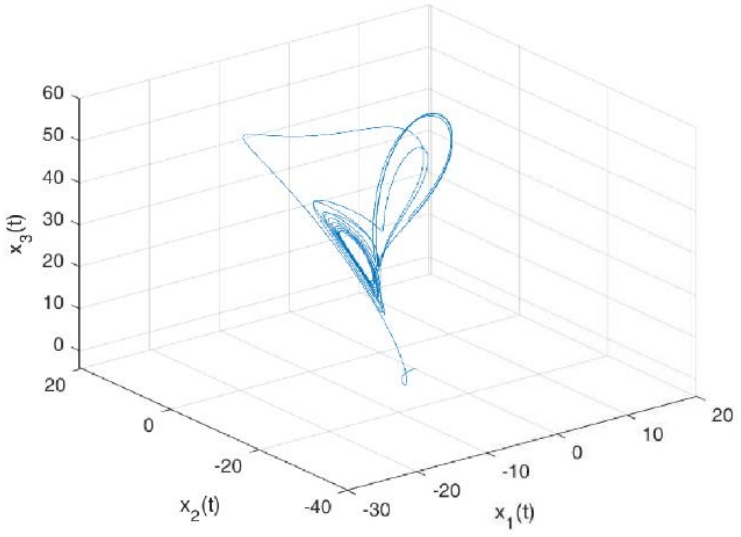
٤- شبیه سازی و نتایج

در ای بخش به پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی در فصل قبل پرداخته می‌شود. ابتدا با رویکرد سیستمی مطرح شده سپس به پیاده‌سازی همزمانی پرداخته می‌شود. دینامیک هرکدام از گره‌های سیستم آشوبناک یکپارچه ۱ در نظر گرفته می‌شود. این سیستم طبق رابطه (۱) نمایش داده می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = (25\alpha + 10)(x_2 - x_1) \\ \dot{x}_2 = (28 - 35\alpha)x_1 - x_1 x_3 + (29\alpha - 1)x_2 \\ \dot{x}_3 = x_1 x_2 - (8 + \alpha)x_3/3 \end{cases} \quad (۲۸)$$

که x_1, x_2, x_3 حالت‌های سیستم و $\alpha \in [0,1]$ پارامتر سیستم است [۲۰].

رفتار آشوب این سیستم با پارامتر متغیر مابین ۰/۵ و ۰/۷ در شکل۲ نشان داده شده است.

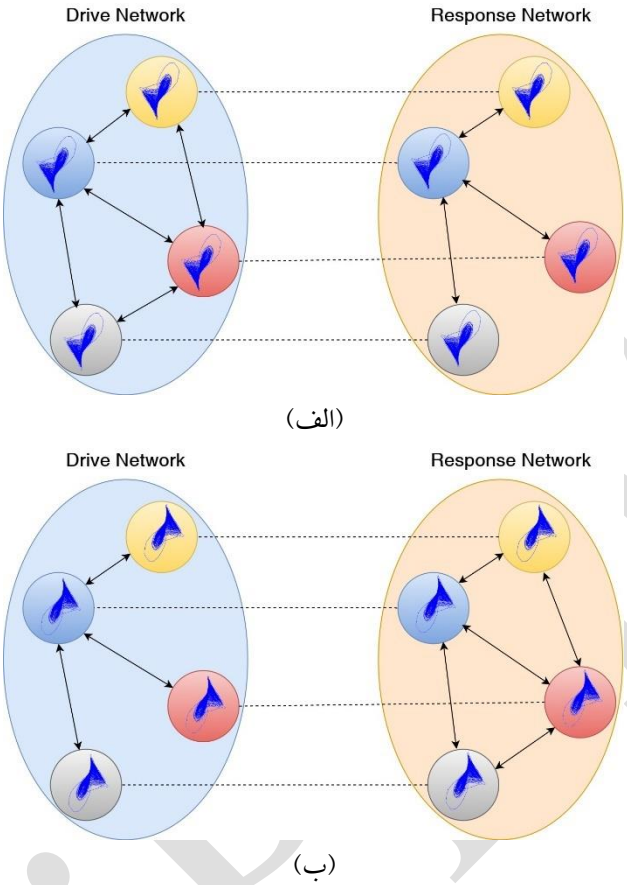


شکل ۲. رفتار آشوبناک سیستم با $\boldsymbol{\alpha = 0.5u(t) + 0.2u(t - 0.15)}$

در این قسمت دو شبکه چهار گره با دینامیک سیستم یکپارچه آشوبناک در نظرگرفته می‌شود. این شبکه‌ها با دو ساختار در شکل

[1] Unified

۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۳. ساختار شبکه : (الف) ساختار اول (ب) ساختار دوم

مدل TS فازی سیستم (۲۸) را می‌توان به‌صورت زیر نمایش داد:

$$Rule\ 1: if\ \ z_1\ is\ M_1(x_1)\ then\ \dot{X} = A_1X$$
$$Rule\ 2: if\ \ x_1\ \ is\ \ M_2(x_1)\ \ then\ \dot{X} = A_2X$$

که $X(t) = \left(x_1(t), x_2(t), x_3(t)\right)^T$ و

$$A_1 = \begin{bmatrix} -25\alpha - 10 & 25\alpha + 10 & 0 \\ 28 - 35\,\alpha & 25\alpha - 1 & -30 \\ 0 & 30 & -(8+\alpha)/3 \end{bmatrix} \quad (۲۹)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -25\alpha - 10 & 25\alpha + 10 & 0 \\ 28 - 35\,\alpha & 25\alpha - 1 & 30 \\ 0 & -30 & -(8+\alpha)/3 \end{bmatrix} \quad (۳۰)$$

همچنین توابع عضویت به‌صورت $M_1(x) = 0.5(1 - \frac{x_1}{d})$ و $M_2(x) = 0.5(1 + \frac{x_1}{d})$ با $d = 30$ در نظر گرفته می‌شود.

دینامیک هرکدام از گره‌ها یک دینامیک متغیر با زمان با تغییرات پارامتری منطبق با شکل ۳ در نظر گرفته شده است. پارامترهای انتخابی به‌صورت $p = 1$ و $C = diag(۱,۱,۲)$ و ماتریس تزویج خارجی در دو ساختار به‌صورت روابط (۳۱) و (۳۲) است:

$$L_1 = \begin{bmatrix} -2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -3 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -3 \end{bmatrix} \quad (۳۱)$$

$$L_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -3 \end{bmatrix} \quad (۳۲)$$

همچنین سوییچ بین دو ساختار در شکل۳ نشان داده شده است. در نتیجه شبکه راه‌انداز با استفاده از رابطه (۱۷) به‌صورت رابطه (۳۳) نوشته می‌شود:

$$\dot{X}_{\mathrm{i}}(\mathrm{t}) = \mathrm{q} \sum_{l=1}^{2} \mathrm{w_l}\big(\mathrm{x_1(t)}\big)\big(\mathrm{A_l X_i(t)}\big) + \sum_{j=1}^{4} \mathrm{L_{ij}\ C\ X_j(t)} \quad (۳۳)$$

همچنین با استفاده از رابطه (۱۸) شبکه پاسخ به‌صورت (۳۴) نوشته می‌شود:

$$\begin{cases} \dot{Y}_{\mathrm{i}}(\mathrm{t}) = \mathrm{q} \sum_{l=1}^{2} \mathrm{w_l}\left(y_1(\mathrm{t})\right)\left(\mathrm{A_l} Y_{\mathrm{i}}(\mathrm{t})\right) + \sum_{j=1}^{4} \mathrm{L_{ij}\ C\ } Y_{\mathrm{j}}(\mathrm{t}) & t \neq \tau_k \\ Y_i(t^+) - Y_i(t^-) = \mathrm{q} \sum_{l=1}^{2} \mathrm{w_l}\left(y_1(\mathrm{t})\right)\left(\mathrm{B_l} E_{\mathrm{i}}(\mathrm{t})\right) & t = \tau_k \end{cases} \quad (۳۴)$$

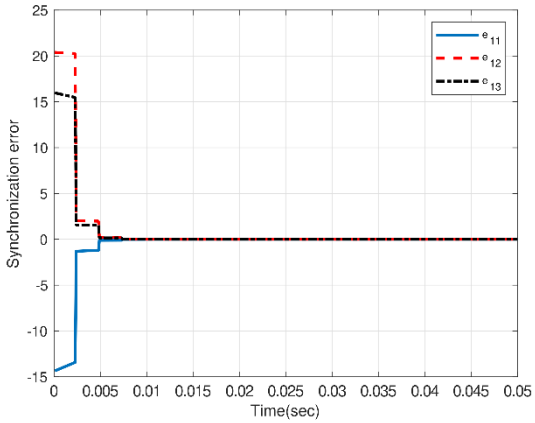
در نتیجه دینامیک خطای همزمانی طبق رابطه (۳۵) به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{E}_{\mathrm{i}}(\mathrm{t}) = \mathrm{q} \sum_{l=1}^{2} \mathrm{w_l e_1}(t)\mathrm{A_l} E_i(t) + p \sum_{j=1}^{4} \mathrm{L_{ij}\ C\ } E_{\mathrm{j}}(\mathrm{t}) \\ +\mathrm{q} \sum_{l=1}^{2} w_l\big(y_l(t)\big) - w_l\big(x_l(t)\big)\big(\mathrm{A_l X_i(t)}\big) \quad t \neq \tau_k \\ E_i(t^+) - E_i(t^-) = \mathrm{q} \sum_{l=1}^{2} \mathrm{w_l}\big(e_1(\mathrm{t})\big)\big(\mathrm{B_l} E_{\mathrm{i}}(\mathrm{t})\big) \quad t = \tau_k \end{cases} \quad (۳۵)$$

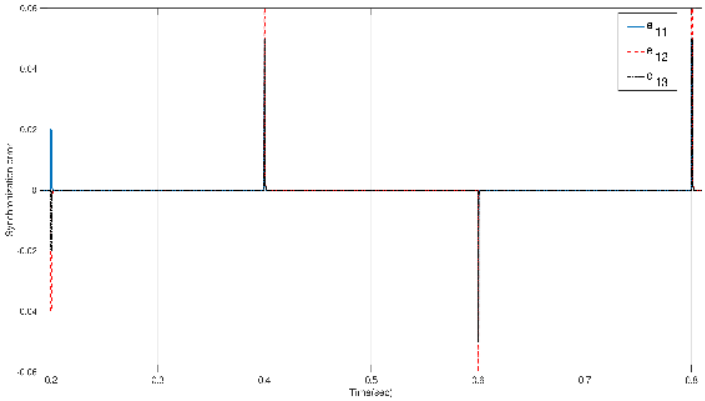
با انتخاب $u(t) = -q \sum_{l=1}^{2}\big[w_l\big(y_1(t)\big) - w_l\big(x_1(t)\big)\big]A_l\, X_i$ از قضیه ۱ استفاده می‌شود. با توجه به ماتریس‌های سوییچینگ (۳۱) و (۳۲) در این مثال حساب شده و مقدار ۵۸/۳ به‌دست می‌آید. با در نظر گرفتن $\tau_k = 25\ msec$ و $B = -diag(0.9,0.9,0.9)$ رابطه (۲۳) برقرار می‌شود.

Print

خطای همزمانی بین دو شبکه متغیر با زمان در شکل ۴ نشان داده شده است. خطای همزمان‌سازی در لحظات سوییچ نیز در شکل ۵ نمایش داده شده‌است.

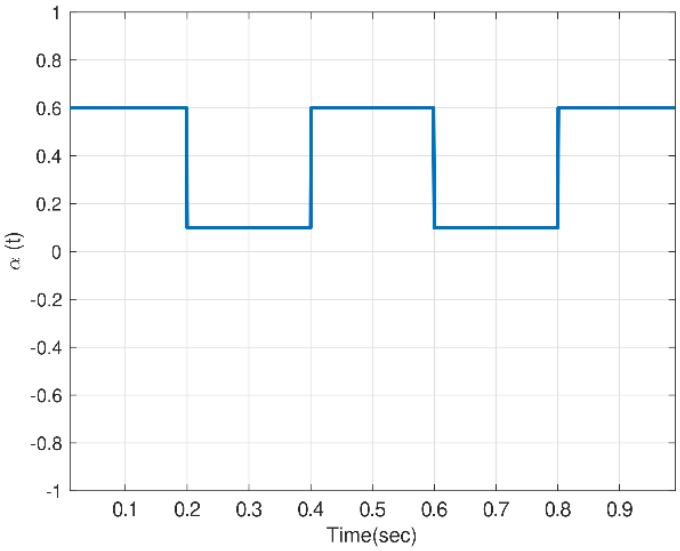


شکل ۴. خطاهای همزمانی در گره اول ما بین دو شبکه تغییرپذیر

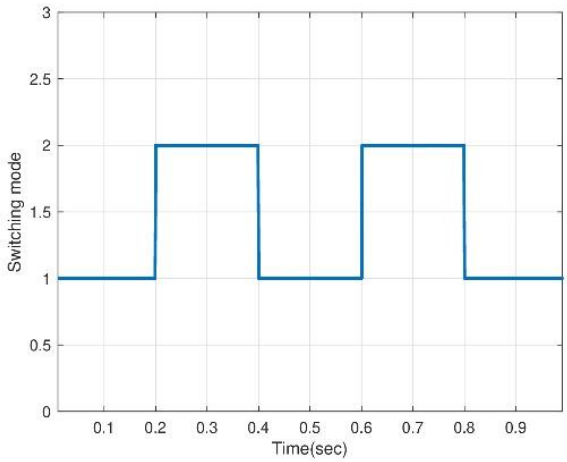


شکل ۵. خطاهای همزمانی در گره اول ما بین دو شبکه تغییرپذیر در لحظات سوییچ

همان‌طور که از شکل‌های ۴ و ۵ پیداست، برای دو ساختار تغییرپذیر یکسان، همزمانی در کمتر از ۵ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد. نحوه تغییر پارامتر در دینامیک هر کدام از گره‌ها در شکل ۶ و نحوه تغییر ساختار شبکه‌ها در شکل ۷ آورده شده است.

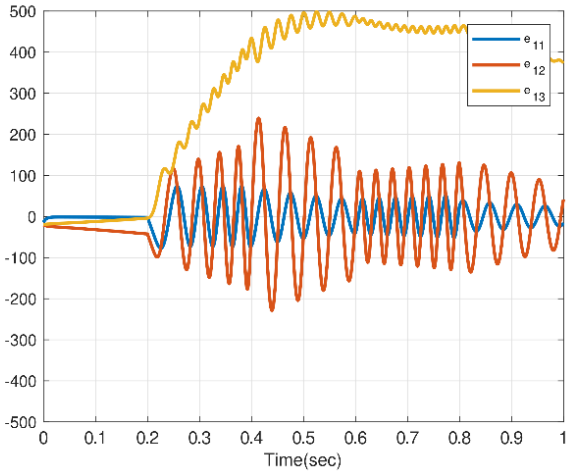


شکل ۶. تغییرات پارامتر $\boldsymbol{\alpha(t)}$ در هر کدام از گره های شبکه پاسخ

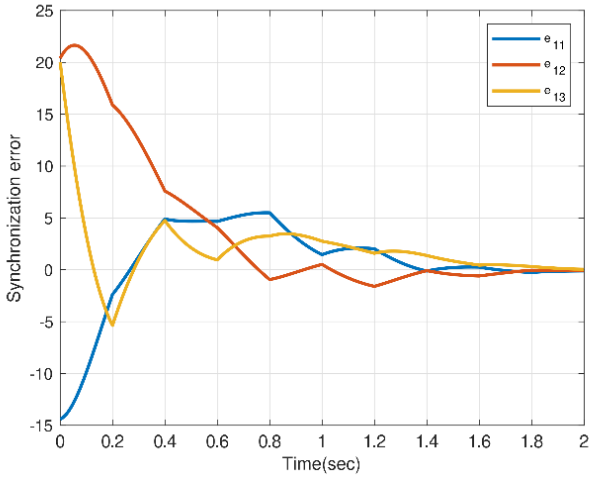


شکل ۷. حالات تغییر در شبکه پاسخ

نتایج مقایسه خطای همزمانی با روش ارائه شده در [۲۱و۲۲] در دینامیک گره اول در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده‌است.



شکل ۸. خطاهای همزمانی در گره اول ما بین دو شبکه تغییرپذیر یکسان با روش مرجع [۲۱]



شکل ۹. خطاهای همزمانی در گره اول ما بین دو شبکه تغییرپذیر یکسان با روش مرجع [۲۲]

همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود روش مورد استفاده در [۲۱] نمی‌تواند دو شبکه یکسان با ساختار متغیر با زمان را همزمان کند. همچنین مقایسه مابین دو شکل ۹ و ۴ حاکی از آن است که روش ارائه‌شده در این مقاله سرعت همزمانی بسیار بیشتری در

مقایسه با روش [۲۲] دارد. همچنین برای نمایش کمی برتری روش پیشنهادی در این مقاله، میانگین مربعات خطا در یکی از حالات یکی از گره‌ها به عنوان نماینده انتخاب شده و نتایج در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. مقایسه میانگین مجذور مربعات خطا حالت اول از گره اول در روش پیشنهادی و مقایسه با روش ارایه شده در مرجع[۲۱]

	روش پیشنهادی	روش مرجع [۲۱]
e_{11}	۰/۴۳	۶۴/۸
e_{12}	۰/۹۸	۱۱۴/۹
e_{13}	۰/۹۳	۷۳۵/۶

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مسئله همزمان‌سازی شبکه‌های آشوبناک متغیر با زمان با استفاده از کنترل فازی-ضربه‌ای مورد بحث و بررسی قرار گرفت. یک رویکرد در این زمینه مطرح شد. با رویکرد سیستم فازی به طراحی کنترل‌کننده مناسب برای همزمانی پرداخته شد. همچنین ساختار شبکه متغیر در نظر گرفته شد. در نظر گرفتن دینامیک و ساختار متغیر برای همزمان‌سازی شبکه‌های همراه با تاخیر و ساختار نامعین از مواردی بود که تا پیش از این بررسی نگردیده بود.

مراجع

[1] Zhu, Zijie, Yiwen Liu, Yuanbin Qin, Fangchao Gu, Lei Zhuang, Hulei Yu, and Yanhui Chu. "Tough and strong bioinspired high-entropy all-ceramics with a contiguous network structure." *Nature Communications* 16, no. 1 (2025): 4587.

[2] Arpanahi, Sobhan Khodadadi, Shahrbanoo Hamidpour, and Khatereh Ghasvarian Jahromi. "Mapping Alzheimer's disease stages toward it's progression: A comprehensive cross-sectional and longitudinal study using resting-state fMRI and graph theory." *Ageing Research Reviews* 103 (2025): 102590.

[3] Wang, Chunhua, Yufei Li, Gang Yang, and Quanli Deng. "A review of fractional-order chaotic systems of memristive neural networks." *Mathematics* 13, no. 10 (2025): 1600.

[4] Henry, Jerome, Pascal Thubert, and Jean-Philippe Vasseur. "Adaptive adjustments of network settings for high-reliability wireless network." U.S. Patent Application 18/592,319, filed June 19, 2025.

[5] Zhang, Wentao, Zhiqiang Zuo, and Yijing Wang. "Active synchronization for double-integrator network systems without velocity information." *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 69, no. 6 (2022): 2589-2600.

[6] Zhao, Lin-hao, Shiping Wen, Chaojie Li, Kaibo Shi, and Tingwen Huang. "A recent survey on control for synchronization and passivity of complex networks." *IEEE Transactions on Network Science and Engineering* 9, no. 6 (2022): 4235-4254.

[7] Tan, Fei, Lili Zhou, Junwei Lu, Yuming Chu, and Yongmin Li. "Fixed-time outer synchronization under double-layered multiplex networks with hybrid links and time-varying delays via delayed feedback control." *Asian Journal of Control* 24, no. 1 (2022): 137-148.

[8] Ma, Weiyuan, Zhiming Li, and Nuri Ma. "Synchronization of discrete fractional-order complex networks with and without unknown topology." *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* 32, no. 1 (2022).

[9] Liu, Yan, Wentao Xu, and Shuo Sun. "Synchronization of stochastic hybrid coupled systems via completely aperiodically intermittent discrete observation control." *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 21, no. 4 (2023): 5379-5388.

[10] Debove, Ines, Steffen Paschen, Deborah Amstutz, Francisco Cardoso, Jean-Christophe Corvol, Victor SC Fung, Anthony E. Lang et al. "Management of impulse control and related disorders in Parkinson's disease: an expert consensus." *Movement Disorders* 39, no. 2 (2024): 235-248.

Preprint

[11] Hamblin, Ross, and Niki Karavitaki. "Impulse control disorders in patients with pituitary tumors treated with dopamine agonists: a systematic review." *Archives of Medical Research* 54, no. 8 (2023): 102910.

[12] Ai, Zidong, Lianghong Peng, Guangdeng Zong, and Kaibo Shi. "Impulsive control for nonlinear systems under DoS attacks: A dynamic event-triggered method." *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* 69, no. 9 (2022): 3839-3843.

[13] Ji, Xinrui, Jianquan Lu, Bangxin Jiang, and Jie Zhong. "Network synchronization under distributed delayed impulsive control: Average delayed impulsive weight approach." *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems* 44 (2022): 101148.

[14] Qiu, Ruiyang, Ruihai Li, and Jianbin Qiu. "A novel step-function method for stability analysis of T–S fuzzy impulsive systems." *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 30, no. 10 (2022): 4399-4408.

[15] Han, Fang, and Hai Jin. "Impulsive control of nonlinear multiagent systems: A hybrid fuzzy adaptive and event-triggered strategy." *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 33, no. 6 (2025): 1889-1898.

[16] Li, Ruihong, Huaiqin Wu, and Jinde Cao. "Exponential synchronization for variable-order fractional discontinuous complex dynamical networks with short memory via impulsive control." *Neural Networks* 148 (2022): 13-22.

[17] Sun, Junwei, Mengjie Zang, Peng Liu, and Yanfeng Wang. "A secure communication scheme of three-variable chaotic coupling synchronization based on DNA chemical reaction networks." *IEEE Transactions on Signal Processing* 70 (2022): 2362-2373.

[18] Sun, Junwei, Mengjie Zang, Peng Liu, and Yanfeng Wang. "A secure communication scheme of three-variable chaotic coupling synchronization based on DNA chemical reaction networks." *IEEE Transactions on Signal Processing* 70 (2022): 2362-2373.

[19] Wang, Hao, Xinsong Yang, Zhengrong Xiang, Rongqiang Tang, and Qian Ning. "Synchronization of switched neural networks via attacked mode-dependent event-triggered control and its application in image encryption." *IEEE Transactions on Cybernetics* 53, no. 9 (2022): 5994-6003.

[20] Shukla, Vijay K., Mahesh C. Joshi, Grienggrai Rajchakit, Juan E. Nápoles Valdes, and Prashant K. Mishra. "Matrix projective synchronization and mechanical analysis of unified chaotic system." *Mathematical Methods in the Applied Sciences* 47, no. 7 (2024): 6666-6682.

[21] Serrano, Fernando E., and Dibakar Ghosh. "Robust stabilization and synchronization in a network of chaotic systems with time-varying delays." *Chaos, Solitons & Fractals* 159 (2022): 112134.

[22] Sang, Hong, Fang Li, Shuaibing Zhu, Hong Nie, and Jun Fu. "Dissipativity analysis and bumpless transfer control for synchronization of switched delayed neural networks: A modified combined switching approach." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* (2025).

Print