

تخمین حالت دینامیک‌های غیرخطی بر روی کانال مخابراتی دیجیتال بدون نویز ظرفیت محدود: کاربرد در کنترل از راه دور وسایل نقلیه‌ی خودکار

علی پارسا^۱، دانشجوی دکترا، علی‌رضا فرهادی^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف-تهران - ایران - parsa_ali@ee.sharif.edu

۲- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی شریف-تهران- ایران - afarhadi@sharif.edu

چکیده: در این مقاله، با در نظر گرفتن دینامیک‌های غیرخطی و به‌طور ویژه دینامیک پهبادهای مینیاتوری یا اتومبیل‌های خودکار به‌صورت مدل تک سیکله^۱ و سپس اعمال روش خطی‌سازی مناسب، به طراحی کدگذار^۲ و کدگشای^۳ مناسب پرداخته می‌شود. از آنجایی که در این سیستم‌ها ردیابی مسیر حالت سیستم غیرخطی در تخمین‌زننده‌ی راه دور، از طریق ارسال داده‌های اندازه‌گیری شده توسط کانال مخابراتی دیجیتال ظرفیت محدود صورت می‌گیرد، نیاز به کدگذار و کدگشای مناسب است تا نواقص مخابراتی را جبران کند. در روش ارائه شده در این مقاله، خطی‌سازی‌ها هنگامی که خطای تخمین متغیرهای حالت سیستم افزایش می‌یابد، صورت می‌گیرد و در صورت کاهش خطای تخمین از خطی‌سازی صورت گرفته در مرحله‌ی قبلی استفاده می‌گردد. شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، عملکرد مطلوب روش ارائه‌شده در این مقاله را نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: سیستم کنترل شبکه‌ای، دینامیک غیرخطی، کانال مخابراتی دیجیتال بدون نویز، وسایل نقلیه‌ی خودکار.

State Estimation of Nonlinear Dynamics Systems over the Digital Noiseless Channel Subject to Limited Capacity: Application in Remote Control of Autonomous Vehicles

A. Parsa, PhD student¹, A.R. Farhadi, Assistant Professor²

1- Faculty of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, Email: parsa_ali@ee.sharif.edu

2- Faculty of Electrical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, Email: afarhadi@sharif.edu

Abstract: In this paper, the nonlinear dynamics and especially the dynamics of the miniature drones or autonomous road vehicles is considered as the unicycle model; and then, by implementing a suitable linearization method, a proper encoder and decoder are designed. Since tracking the state trajectory of these nonlinear systems by remote estimator is achieved by sending measurements through the limited capacity digital noiseless channel, proper encoder and decoder are needed to compensate the effects of communication imperfections. In the method presented in this paper, linearization occurs when the state estimation error increases; and when the estimation error decreases, the previous linearized zone is used. Computer simulations illustrate the satisfactory performance of the proposed method in this paper.

Keywords: Networked control system, nonlinear dynamics, the digital noiseless channel, autonomous vehicles.

تاریخ ارسال مقاله:

تاریخ اصلاح مقاله:

تاریخ پذیرش مقاله:

نام نویسنده مسئول: دکتر علی‌رضا فرهادی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تهران - خیابان آزادی - دانشگاه شریف - دانشکده مهندسی برق.

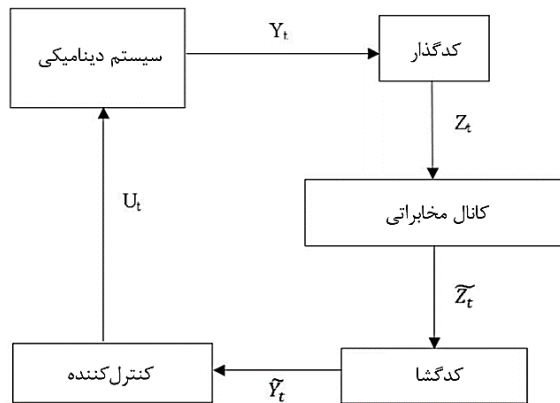
۱- مقدمه

۱-۱- انگیزه و پیشینه

در سال‌های اخیر به دلیل ظهور سیستم‌هایی که در آن سیستم‌های دینامیکی و کنترل‌کننده‌ی آن نسبت به هم فاصله دارند، مسئله‌ی ردیابی و پایدارسازی سیستم‌های دینامیکی بر روی کانال‌های مخابراتی مورد توجه قرار گرفته است. سیستم‌های خودکار حفاری چاه‌های نفت/گاز، سیستم‌های چندعاملی متشکل از ربات‌های کوچک خودکار و سیستم‌های انتقال توان هوشمند نمونه‌هایی از این نوع سیستم‌ها می‌باشند. این سیستم‌ها مثال‌هایی از سیستم‌های کنترل شبکه‌ای هستند. در این سیستم‌ها برخلاف سیستم‌های متداول کنترلی، انتقال اطلاعات بر روی کانال‌های مخابراتی صورت می‌گیرد که این کانال‌ها دارای محدودیت‌های نظیر محدودیت در توان ارسالی اطلاعات و یا پهنای باند و هم‌چنین اثرات نامطلوب بر روی سیگنال‌های انتقال داده شده، نظیر اعوجاج و نویز هستند. از آنجایی که روش‌های متداول جهت طراحی کنترل‌کننده‌ها بدون در نظر گرفتن محدودیت‌ها و اثرات نامطلوب کانال‌های مخابراتی توسعه یافته‌اند، در صورتی که اثرات نامطلوب مخابراتی جبران نگردند، این محدودیت‌ها و اثرات نامطلوب باعث تضعیف کارایی و حتی ناپایداری می‌گردند. لذا جهت جبران‌سازی این محدودیت‌ها و اثرات نامطلوب در حلقه‌ی کنترل، باید از روش‌های کدگذاری مناسب استفاده شود. اما روش‌های متداول کدگذاری در مخابرات، باعث ایجاد تاخیر زمانی زیادی در حلقه کنترل می‌گردند که خود باعث تضعیف کارایی و ناپایداری سیستم‌های کنترل شبکه‌ای می‌شوند. بنابراین در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای باید روش‌های کدگذاری دیگری با انتخاب کدگذار و کدگشای مناسب، جهت ردیابی بردارهای حالت و سیگنال‌های کنترل عبوری از کانال‌های مخابراتی به صورت زمان حقیقی طراحی شود. هم‌چنین، کنترل‌کننده‌ها در سیستم‌های کنترل شبکه‌ای باید به‌گونه‌ای توسعه یابند که با تحمل اندکی خطا در انتقال اطلاعات قادر به پایدارسازی سیستم باشند.

با توجه به کاربردهای فراوان سیستم‌های کنترل شبکه‌ای، در مقالات زیادی به این موضوع پرداخته شده است. این مقالات عمدتاً به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند. در دسته‌ی اول، هدف، طراحی کدگذار، کدگشا و کنترل‌کننده‌ی مناسب جهت ردیابی و پایدارسازی بر روی کانال‌های مخابراتی (فاقد نویز یا نویزی) است که تحت محدودیت‌های مخابراتی نظیر ظرفیت یا پهنای باند محدود هستند [۱-۲۲]. در دسته‌ی دوم، هدف، پایدارسازی سیستم‌های دینامیکی بر روی کانال‌های مخابراتی است که تحت تاثیرات نامطلوب انتقال، نظیر نویز، تاخیر و از دست رفتن تصادفی داده‌های ارسالی هستند در حالی که هیچ محدودیت مخابراتی‌ای روی نرخ ارسال داده‌ها وجود ندارد [۲۳-۳۴]. در بیش‌تر این مقالات، مسئله‌ی ردیابی و پایدارسازی به مسئله پایه‌ای شکل ۱ متمرکز شده است [۱-۲۲]. این بلوک دیاگرام می‌تواند معرف یک سیستم کنترل شبکه‌ای باشد که در آن انتقال اطلاعات از سیستم

دینامیکی به کنترل‌کننده‌ی راه دور متناظر آن، از طریق یک کانال مخابراتی که با سایر سیستم‌ها مشترک است، صورت می‌گیرد، ولی کانال مخابراتی از کنترل‌کننده‌ی راه دور به سیستم تحت کنترل اختصاصی است و به همین دلیل انتقال اطلاعات از کنترل‌کننده به سیستم تحت کنترل بدون خطا و محدودیت مخابراتی، صورت می‌گیرد.



شکل ۱: دیاگرام بلوکی پایه برای سیستم‌های کنترل شبکه‌ای.

هم‌چنین این بلوک دیاگرام، معرف مسئله‌ی کنترل از راه دور و سایل نقلیه‌ی کوچک خودکار (برای مثال پهبادهای مینیاتوری) است. به علت اندازه‌ی کوچک این وسایل نقلیه‌ی خودکار و استفاده از باتری‌های ظرفیت محدود به عنوان منبع تغذیه، انتقال اطلاعات در این سیستم‌ها، از وسیله‌ی نقلیه به کنترل‌کننده‌ی راه دور (واقع در اتاق فرمان) با محدودیت و خطاهای مخابراتی همراه است، حال آن‌که چون ارسال اطلاعات از اتاق فرمان به وسیله‌ی نقلیه می‌تواند با بالایی صورت گیرد، انتقال اطلاعات از کنترل‌کننده به وسیله‌ی نقلیه می‌تواند تقریباً بدون محدودیت و خطاهای مخابراتی در نظر گرفته شود.

در مقالات [۱-۲۲] علاوه بر طراحی کدگذار، کدگشا و کنترل‌کننده‌ی مناسب، شرایط لازم و کافی‌ای برای پایدارسازی و ردیابی ارائه شده است. در بیش‌تر موارد این شرایط به صورت یک باند پایین بر حسب نرخ تغییرات سیستم دینامیکی بر روی ظرفیت انتقال کانال مخابراتی ارائه شده است. در بیش‌تر این مقالات، بعد از پیدا کردن یک شرط لازم به فرم حد پایین بر روی ظرفیت انتقال، یک کدگذار، کدگشا و کنترل‌کننده ارائه شده است که ردیابی و پایدارسازی را برای حالتی که ظرفیت انتقال برابر با حد پایین شرط لازم است، فراهم می‌آورد. در این مقالات نتیجه‌گیری می‌شود که این حد پایین بر روی ظرفیت انتقال، معرف یک شرط لازم و کافی بر روی ظرفیت انتقال کانال مخابراتی برای ردیابی و پایدارسازی است. به عبارت دیگر، این حد پایین کم‌ترین ظرفیتی است که تحت آن، روش کدگذاری مناسب و کنترل‌کننده‌ای برای ردیابی و پایدارسازی وجود دارد. برای سیستم‌های خطی این شرط به صورت، شرط نرخ مقادیر ویژه به صورت زیر، به دست آمده است:

$$C \geq \sum_{(|\lambda_i(A)| > 1)} \log_2 |\lambda_i(A)| \quad (1)$$

در اکثر قریب به اتفاق این مقالات، سیستم دینامیکی، خطی در نظر گرفته شده است، در حالی که در عمل بیش تر سیستم‌های شبکه‌ای ماهیت غیرخطی از خود نشان می‌دهند و به صورت غیرخطی مدل می‌شوند. در برخی مقالات از جمله [۱۷، ۱۸، ۲۳، ۳۵ و ۳۶] سیستم کنترل شونده در سیستم کنترل شبکه‌ای غیرخطی فرض شده است. همان‌طور که گفته شد مقاله‌ی [۱۷] به مسئله‌ی پایدارسازی سیستم‌های غیرخطی بر روی کانال‌های مخابراتی دیجیتال بدون نویز پرداخته است و مقاله‌ی [۱۸] به مسئله‌ی پایداری مجانبی کلی یک سیستم دینامیکی غیرخطی پیوسته‌زمان تغییرناپذیر با زمان بر روی کانال مخابراتی پرداخته که اندازه‌گیری‌ها توسط کنترل‌کننده در زمان‌های گسسته دریافت می‌شود. در مقاله‌ی [۲۳] به مسئله‌ی ردیابی برداری از خروجی‌های زیرسیستم‌های یک دینامیک غیرخطی و نویزی توزیع‌شده، بر روی شبکه‌ی مخابراتی باینری متقارن پرداخته شده است. در این مقاله، فرض شده است که زیرسیستم‌های غیرخطی تحت اغتشاش‌های خارجی محدود و اندازه‌گیری‌ها همراه نویزهای محدود هستند و کدگذار و کدگشای مناسب برای ردیابی سیستم غیرخطی طراحی شده است. همان‌طور که در دسته‌ی اول مقالات سیستم‌های کنترل شبکه‌ای گفته شد، این مقالات، شرط لازم یا کافی متناسب با ظرفیت کانال مخابراتی برای پایدارسازی سیستم ارائه کرده‌اند.

در مقاله‌ی [۳۵] کنترل سیستم غیرخطی به‌صورتی که در آن انتقال اطلاعات از کنترل‌کننده به سیستم، از طریق کانال مخابراتی‌ای که با دست‌رفتن تصادفی داده‌ها و تاخیر زمانی همراه است، صورت می‌گیرد. برای جبران‌سازی اثرات نامطلوب کانال مخابراتی، کنترل‌کننده، دنباله‌ای از ورودی‌های سیستم را به یک بافر در گره‌ی عملگر انتقال می‌دهد. سپس با توسعه‌ی یک مدل سیستم کنترل شبکه‌ای که اندازه‌ی محتویات بافر را مشخص می‌کند، شروط کافی برای پایداری تصادفی سیستم وقتی که از دست‌رفتن تصادفی داده‌ها و تاخیر زمانی کانال i.i.d. باشد، ارائه شده است. در مقاله‌ی [۳۶]، یک تئوری پایداری ساده بر اساس روش لیاپانوف-کراسوفسکی برای سیستم‌های کنترل شبکه‌ای شامل سیستم غیرخطی پیوسته‌زمان و کانال مخابراتی دارای تأخیر زمانی متغیر ارائه شده است.

۱-۲- نوآوری‌های مقاله

یکی از مسائل به‌روز، مسئله‌ی کنترل از راه دور وسایل نقلیه‌ی خودکار نظیر پهبادهای مینیاتوری یا اتومبیل‌های خودکار است. دینامیک این وسایل توسط دینامیک غیرخطی تک‌سیکله قابل توصیف است. لذا در این مقاله، دینامیک غیرخطی تک‌سیکله به‌عنوان مدلی برای وسایل نقلیه‌ی خودکار، در قسمت شبیه‌سازی، در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین، با توجه به این که در این سیستم‌ها انتقال اطلاعات از طریق امواج الکترومغناطیسی که تقریباً با سرعت نور حرکت می‌کنند، صورت می‌گیرد، تاخیری در انتقال اطلاعات به‌وجود نمی‌آید؛ هم‌چنین در این مقاله فرض می‌شود که وسیله‌ی نقلیه‌ی خودکار به مرکز کنترل

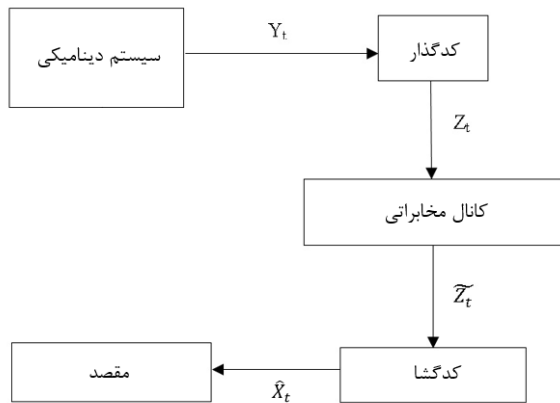
که در آن C ظرفیت انتقال کانال مخابراتی، A ماتریس سیستم خطی و $\lambda_i(A)$ نشان‌دهنده‌ی مقادیر ویژه‌ی ماتریس A است.

از بین این مقالات، مقاله‌ی [۱] به مسئله پایدارسازی یک سیستم خطی گسسته‌زمان، نامتغیر با زمان و تماماً رویت شونده بدون نویز که تحت شرط اولیه‌ی تصادفی است، پرداخته است. مقاله از فیدبک حالت برای پایدارسازی سیستمی استفاده کرده که در آن اندازه‌گیری حالت سیستم به صورت کوانتیزه شده در دسترس است و نتیجه‌گیری کرده است که اگر سیستم دینامیکی ناپایدار باشد، هیچ استراتژی کنترلی برای پایداری مجانبی کلی وجود نخواهد داشت، در حالی که اگر سیستم پایدار باشد به‌ازای هر شرط اولیه‌ای (تحت شرایطی بر روی تعداد سطوح کوانتیزه) می‌توان قانون کنترل فیدبکی پیاده‌سازی کرد که مسیر حالات سیستم حلقه بسته را برای یک زمان طولانی دلخواه تا حد دلخواهی نزدیک به صفر نگه دارد. در [۲] به مسئله تخمین حالت‌های یک سیستم پیوسته‌زمان خطی تغییرناپذیر با زمان تماماً رویت‌شونده بدون نویز بر روی یک کانال مخابراتی دیجیتال بدون نویز با ظرفیت انتقال محدود پرداخته شده است. برخلاف مسائل کلاسیک در [۲] این محدودیت وجود دارد که اندازه‌گیری از حالت‌های سیستم باید کدگذاری شود و در طول یک کانال مخابراتی دیجیتال با نرخ بیت محدود (ظرفیت انتقال محدود) مخابره شود. در این مقاله فرض شده است که حالات اندازه‌گیری‌شده با توجه به یک طرح کدگذاری پیش‌شوندی، کد می‌شوند. در نهایت این مقاله، به مسئله‌ی تخمین سیستم گسسته‌زمان معادل بر روی کانال مخابراتی دیجیتال بدون نویز با نرخ بیت محدود پرداخته است.

در [۱۶-۳] نویسندگان به مسئله‌ی ردیابی و پایدارسازی سیستم‌های خطی بر روی کانال‌های مخابراتی ظرفیت محدود پرداخته‌اند. در این مقالات نشان داده شده است که شرط نرخ مقدار ویژه، کم‌ترین ظرفیت انتقال برای ردیابی و پایدارسازی سیستم‌های خطی تغییرناپذیر با زمان بر روی کانال‌های مخابراتی است. به عبارت دیگر شرط نرخ مقدار ویژه یک شرط لازم و کافی بر روی ظرفیت انتقال کانال مخابراتی برای ردیابی و پایدارسازی سیستم‌های دینامیکی خطی بر روی کانال‌های مخابراتی است.

در [۱۷] به مسئله‌ی پایدارسازی سیستم‌های غیرخطی بر روی کانال‌های مخابراتی دیجیتال پرداخته شده است. هدف این مقاله، پایدارسازی سیستم‌های غیرخطی گسسته‌زمان تغییرناپذیر با زمان فاقد نویز و تماماً مشاهده‌شونده است که شرط اولیه آن‌ها نام‌شخص است. هم‌چنین، در [۱۸] به مسئله‌ی پایداری مجانبی کلی یک سیستم دینامیکی غیرخطی پیوسته‌زمان تغییرناپذیر با زمان پرداخته شده که اندازه‌گیری‌ها توسط کنترل‌کننده در زمان‌های گسسته دریافت می‌شود. در این مقاله، نویسندگان شرط کافی‌ای برای پایدارسازی مجانبی فراگیر، که شامل رابطه‌ای بین تعداد داده‌های گرفته‌شده توسط کدگذار و فرکانس نمونه‌برداری و بر اساس پایدارسازی ورودی به حالت سیستم با وجود نویز اندازه‌گیری است، پیدا کرده‌اند.

متغیرهای حالت و سایل نقلیه‌ی خودکار باشد که از آن در نهایت جهت کنترل از راه دور این و سایل می‌توان استفاده نمود (همان‌طور که گفته شد با توجه به این که هدف این مقاله، ارائه‌ی کدگذار و کدگشای مناسب جهت ردیابی سیستم است که این ردیابی بتواند در کنترل‌کننده استفاده شود، در ارائه مطالب و شکل ۲، کنترل‌کننده در نظر گرفته نشده است).



شکل ۲: دیاگرام بلوکی مسئله‌ی ردیابی سیستم دینامیکی غیرخطی (برای نمونه سیستم کنترل از راه دور وسایل نقلیه‌ی خودکار).

در ادامه به تعریف دقیق‌تر اجزای سیستم پرداخته می‌شود:

سیستم دینامیکی: مدل در نظر گرفته شده در این قسمت، مدل فضای حالت غیرخطی قابل خطی‌سازی، به فرم زیر است که می‌تواند معرف دینامیک وسایل نقلیه‌ی خودکار باشد:

$$\begin{cases} X_{t+1} = f(X_t, u_t), & X_t, Y_t \in \mathcal{R}^n, X_0 \in \Lambda_0 \subset \mathbb{R}^n \\ Y_t = X_t \end{cases} \quad (2)$$

کانال مخابراتی: انتقال اطلاعات در این سیستم توسط کانال دیجیتال بدون نویز ظرفیت محدود صورت می‌گیرد. این کانال در زمان t ، بسته‌ای^۴ از داده‌های باینری به طول R_f را بدون خطا از خود عبور می‌دهد.

کدگذار: کدگذار به صورت تابع $Z_t = \mathcal{E}(Y_t)$ تعریف می‌شود که اطلاعات خروجی سیستم را به صورت مناسب کد و به صورت بسته‌ای از داده‌های باینری از طریق کانال مخابراتی ارسال می‌کند.

کدگشا: کدگشا تابعی به صورت $\hat{X}_t = D(\tilde{Z}_t)$ است که خروجی کانال مخابراتی را دریافت می‌کند و پس از کدگشایی، تخمینی از حالت سیستم را به دست می‌دهد. توجه شود که در این مقاله $Y_t = X_t$.

همچنین توجه شود که از آنجایی که کانال مخابراتی بدون خطا است، اطلاعاتی که کدگذار ارسال می‌نماید، دقیقاً توسط کدگشا دریافت می‌گردد؛ لذا کدگذار از اطلاعات دریافت‌شده توسط کدگشا، کاملاً اطلاع دارد. همچنین کدگذار از روش کدگشایی‌ای که کدگشا به کار می‌بندد، اطلاع دارد. لذا در هر لحظه t می‌تواند تخمین \hat{X}_{t-1} را بر

نزدیک است به گونه‌ای که نویز قابل صرف نظر کردن است؛ اما به علت دیجیتال بودن کانال و ظرفیت محدود آن در تعداد نرخ بیت ارسالی، مدل کانال دیجیتال بدون نویز، مدل مناسبی برای بررسی عملکرد کنترل شبکه‌ای این سیستم‌هاست. به عنوان اولین قدم جهت طراحی کنترل‌کننده‌ی راه دور مناسب برای این دینامیک، کدگذار و کدگشای مناسبی جهت انتقال اطلاعات از طریق کانال مخابراتی دیجیتال بدون نویز با ظرفیت محدود ارائه می‌گردد. این طراحی به یک دینامیک تک‌سایکل، اعمال می‌گردد و با انجام شبیه‌سازی‌های کامپیوتری، صحت نتایج بر روی این مسئله نشان داده می‌شود.

برای طراحی کدگذار و کدگشا از یک روش مبتنی بر خطی‌سازی در بازه‌های مختلف استفاده می‌شود. بازه‌های خطی‌سازی بر اساس کاهش خطای تخمین حالت سیستم در نظر گرفته می‌شوند؛ بدین معنا که در کدگذار مقدار حالت سیستم با مقدار تخمین‌زده شده مقایسه می‌گردد؛ در صورت کاهش خطای تخمین در هر مرحله از ارسال اطلاعات و تخمین، مدل خطی‌سازی شده قبلی استفاده می‌شود. لیکن به محض آن که خطا سیر صعودی داشت، خطی‌سازی در نقطه‌ی کار جدیدی صورت می‌گیرد. شایان ذکر است در مقاله [۹] صرفاً به سیستم‌های خطی پرداخته شده است. لیکن در این مقاله با استفاده از نتایج این مرجع برای سیستم‌های خطی و با ارائه‌ی روش نوینی در خطی‌سازی و تعیین زمان‌های آن، اقدام به ارائه روشی برای ردیابی سیستم‌های غیرخطی، من جمله وسایل نقلیه‌ی خودکار شده است که این از نوآوری‌های این مقاله نسبت به مرجع [۹] است. علاوه بر این، از دیگر نوآوری‌های این مقاله تعیین حد بالایی برای دو زمان متوالی خطی‌سازی است؛ حال آن که در اکثر مقالات مربوط به پایداری سیستم‌های سویچینگ، حد پایینی برای دو زمان متوالی سویچینگ ارائه می‌گردد.

۳-۱- ساختار مقاله

در ادامه‌ی مقاله، ابتدا صورت مسئله مطرح شده است. در بخش ۳ کدگذار و کدگشای مناسب ارائه و بررسی می‌شود. بخش ۴ به شبیه‌سازی کامپیوتری اختصاص یافته است و مقاله در فصل ۵ با جمع‌بندی و نتیجه‌گیری پایان می‌یابد.

۲- تعریف مسئله

در این مقاله، $E[\cdot]$ نشان دهنده امید ریاضی و $|\cdot|$ علامت قدرمطلق است. همچنین ترانهاده‌ی ماتریس A به صورت A^T نشان داده می‌شود. $X^t = (X_0, X_1, \dots, X_t)$ و \mathbb{R}^n معرف فضای اقلیدسی است.

حال دیاگرام بلوکی شکل ۲ را در نظر بگیرید. با توجه به ویژگی‌های گفته‌شده در مقدمه در مورد سیستم کنترل از راه دور وسایل نقلیه‌ی خودکار، این شکل می‌تواند بیان‌گر سیستم ردیابی از راه دور

$|X_1 - \hat{X}_0|$ می‌نماید (علت استفاده از $|X_1 - \hat{X}_0|$ ، به جای خود X_1 آن است که تا جایی که می‌تواند مقدار L_1 در (۶) را کوچک کند). برای کدکردن این سیگنال، بازه‌ی $[-L_1, L_1]$ از (۶) تعیین می‌شود تا مشابه قبل ناحیه‌بندی و نمایه‌ی آن ارسال شود.

$$\begin{aligned} |X_1 - \hat{X}_0| &= |AX_0 - \hat{X}_0| = |A| |X_0 - \hat{X}_0| \\ &\leq |A| V_0 = L_1 \end{aligned} \quad (۶)$$

مشابه قبل، برای زمان‌های $t \geq 1$ ، کدگذار اقدام به کدکردن سیگنال زیر به صورت مشابه می‌نماید:

$$|X_t - \hat{X}_{t-1}| \quad (۷)$$

که نتیجه می‌دهد:

$$|X_t - \hat{X}_t| \leq V_t, \quad V_t = \frac{L_t}{2^R} \quad (۸)$$

به طوری که می‌توان نوشت:

$$V_t = \frac{1}{2^R} |A| V_{t-1} \quad (۹)$$

بنابراین داریم:

$$V_t = \frac{1}{2^R} |A| \frac{1}{2^R} |A| \dots \frac{1}{2^R} |A| V_0 = V_0 \left(\frac{1}{2^R} |A| \right)^{t+1} \quad (۱۰)$$

حال در صورتی که $R > \max\{0, \log_2 |A|\}$ باشد، بدیهی است که V_t با احتمال یک، به سمت صفر می‌رود ($\Pr \left(\lim_{t \rightarrow \infty} \|V_t\| < \infty \right) = 1$). در [۹] نشان داده شده است که $\max\{0, \log_2 |A|\}$ و یا به طور کلی $\max_{i=1}^n \{0, \log_2 |\lambda_i(A)|\}$ که در $\lambda_i(A)$ معرف مقدار ویژه‌ی ماتریس A است، کم‌ترین ظرفیت انتقال برای اینگونه ردیابی است.

از آن جایی که کانال مخابراتی دیجیتال است، جهت ردیابی حالات دینامیک (۲)، لازم است این دینامیک گسسته‌زمان باشد. بنابراین مدل گسسته‌زمان دینامیک (۲) را در نظر بگیرید. ایده‌ی به کاررفته در این مقاله جهت ردیابی متغیرهای حالت مدل دینامیک (۲) آن است که اقدام به خطی سازی این دینامیک حول نقاط کار و سپس اعمال روش ردیابی بالا به مدل خطی سازی شده نمود. برای شروع، مشابه روش خطی، مقدار X_0 کد شده و نمایه‌ی بازه‌ی مربوط به آن از طریق کانال

مخابراتی ارسال می‌شود و \hat{X}_0 در کدگشا تولید می‌شود، هم‌چنین بر این اساس، کدگذار نیز با توجه به اطلاع از مدل کانال (تعداد نرخ بیت ارسالی)، داده‌ای که خودش می‌فرستد و با اطلاع از روش کدگذاری

اساس $\hat{X}_{t-1} = D(\tilde{Z}_{t-1})$ تولید کند و در بررسی‌های خود، به کار گیرد.

هدف مسئله: هدف، طراحی کدگذار و کدگشای مناسب جهت ردیابی مجانبی با احتمال یک^۵ متغیرهای حالت (X_t) سیستم راه دور شکل ۲ می‌باشد، به گونه‌ای که با به کارگیری حداقل نرخ R_j در هر بازه‌ی خطی سازی j ($j = 1, 2, \dots$) رابطه‌ی زیر برقرار باشد:

$$\Pr \left(\lim_{t \rightarrow \infty} \|X_t - \hat{X}_t\| < \infty \right) = 1. \quad (۳)$$

۳- طراحی کدگذار و کدگشا

در این بخش با ترکیب روش ردیابی ارائه شده در [۹] که برای سیستم‌های خطی توسعه یافته است با ایده‌ی خطی سازی مطرح شده در این مقاله، کدگذار و کدگشایی ارائه می‌گردد که سبب ردیابی مسیرهای حالت سیستم نشان داده شده در شکل ۳ می‌شود. در ادامه ابتدا روش ارائه شده در [۹] برای یک سیستم اسکالر خطی تشریح شده، سپس تئوری‌ای ارائه می‌گردد که در آن کدگذار و کدگشای مناسب برای حل مسئله‌ی این مقاله ارائه می‌گردند.

سیستم خطی و اسکالر زیر را در نظر بگیرید:

$$X_{t+1} = AX_t, \quad |X_0| \leq L_0. \quad (۴)$$

در زمان $t=0$ ، کدگذار و کدگشای ارائه شده در [۹] بازه‌ی $[-L_0, L_0]$ را به 2^R ناحیه مساوی تقسیم می‌نمایند (R طول بسته‌ای است که توسط کانال مخابراتی ارسال می‌گردد) و برای هر ناحیه، نمایه‌ای^۶ (به صورت $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_{2^R-1}$) که مشخص کننده‌ی آن ناحیه است، تعیین می‌کنند (مرکز هر ناحیه را به عنوان نمایه‌ی آن ناحیه انتخاب می‌شود). در لحظه‌ی $t=0$ ، کدگذار به محض مشاهده‌ی X_0 ناحیه‌ای را که X_0 در آن تعلق دارد مشخص نموده و نمایه‌ی آن ناحیه را که توسط R بیت مشخص می‌شود، از طریق کانال مخابراتی دیجیتال بدون نویز با ظرفیت محدود، ارسال می‌نماید. سپس کدگشا اطلاعات آن \hat{X}_0 را برابر مقدار نمایه‌ای که ارسال شده است، قرار می‌دهد. بدین ترتیب نامساوی زیر برقرار است:

$$|X_0 - \hat{X}_0| \leq V_0, \quad V_0 = \frac{L_0}{2^R}. \quad (۵)$$

در گام زمانی بعدی ($t=1$)، کدگذار از مقدار \hat{X}_0 و V_0 اطلاع دارد (کدگذار از اطلاعاتی که ارسال می‌کند، مدل کانال و روش کدگذاری‌ای که کدگشا به کار می‌بندد، اطلاع دارد، لذا در هر لحظه t می‌تواند \hat{X}_t و V_t را تولید کند) و اقدام به کدکردن سیگنال

از آن جا که با به کارگیری این استراتژی در طول هر بازه‌ی خطی‌سازی، خطای ردیابی کاهش می‌یابد و به‌محض آن که خطای ردیابی به دلیل فاصله گرفتن از مدل غیرخطی افزایش یابد، خطی‌سازی به‌روزرسانی می‌شود، واضح است که این طراحی کدگذار و کدگشا سبب ردیابی مجانبی با احتمال یک حالات سیستم غیرخطی (۲) بر روی کانال مخابراتی دیجیتال بدون نویز ظرفیت محدود می‌گردد و لذا قضیه‌ی زیر را داریم:

قضیه- شکل ۲ برای سیستم دینامیکی (۲) بر روی کانال مخابراتی دیجیتال بدون نویز ظرفیت محدود را در نظر بگیرید. همچنین فرض نمایید که متوسط زمان سکون τ_a^* که معرف نرخ متوسط تعداد خطی‌سازی‌ها در واحد زمان است، شرط زیر را برآورده می‌سازد:

$$\tau_a \geq \tau_a^*, \quad \tau_a = \frac{t}{N_t}, \quad \tau_a^* = \frac{\ln h}{\ln \lambda - \ln \lambda^*} \quad (12)$$

که در آن N_t تعداد دفعات خطی‌سازی‌شده در بازه‌ی زمانی بوده $[0, t]$ ، h و λ و λ^* به‌صورت زیر تعیین می‌گردند (A_j ماتریس ژاکوبین سیستم گسسته‌زمان معادل در هر بازه‌ی خطی‌سازی است):

$$\lambda_1 < 1 \quad \text{و} \quad \lambda_2 > 1 \quad \text{وجود دارد که روابط زیر برقرار است:}$$

$$\|A_j\| < 1: \|A_j^t\| \leq h_j \lambda_1^t$$

$$\|A_j\| \geq 1: \|A_j^t\| \leq h_j \lambda_2^t \quad (13)$$

آنگاه، $h_j = \max_j h_j$ ، $\lambda \in [\lambda_1, 1]$ و $\lambda^* \in [1, \lambda_2]$ بزرگترین مقداری

است که برای مقادیری از $c > 0$ رابطه‌ی زیر را برقرار می‌نماید:

$$\|X_t\| \leq c(\lambda^*)^t \|X_0\| \quad (14)$$

در این صورت یک شرط کافی برای وجود کدگذار و کدگشای مناسب جهت حصول ردیابی مجانبی با احتمال یک این سیستم، آن است که شرط زیر برای ظرفیت کانال برقرار باشد:

$$C = R_j; \quad j = 1, 2, \dots$$

$$R_j \geq \sum_{(|\lambda_i(A)| > 1)} \log_2 |\lambda_i(A_j)| \quad (15)$$

که در آن C ظرفیت انتقال کانال و R_j نرخ ارسال بیت بر حسب بیت بر گام زمانی در هر بازه‌ی خطی‌سازی است.

اثبات- همان‌گونه که در بالا تشریح شد، با به کارگیری استراتژی توسعه‌یافته در این مقاله، در هر بازه‌ی خطی‌سازی شده، خطای ردیابی کاهش می‌یابد و به‌محض آن که خطای ردیابی سیر صعودی یافت، بازه‌ی خطی‌سازی به‌روزرسانی می‌شود که در داخل این بازه‌ی جدید،

کدگشا، مقدار \hat{X}_0 را تولید می‌کند. سپس کدگذار و کدگشا هر دو اقدام به خطی‌سازی سیستم غیرخطی حول نقطه‌ی کار \hat{X}_0 می‌کنند.

بعد این مدل خطی‌سازی‌شده تا زمانی که خطای تخمین کاهش می‌یابد به‌عنوان جایگزین تقریبی از مدل غیرخطی، به کار می‌رود؛ زیرا بدیهی است تا زمانی که مدل خطی‌سازی‌شده تقریب خوبی از سیستم غیرخطی است، مقدار خطای متغیرهای حالت سیستم نسبت به

تخمین آن‌ها یعنی $\|X_t - \hat{X}_t\|$ ، با استفاده از روش کدکردن توصیف شده در بالا کاهش می‌یابد. لیکن وقتی که مدل خطی‌سازی‌شده، دیگر تقریب خوبی برای سیستم غیرخطی نباشد، این خطا سیر صعودی می‌یابد و لذا از این خاصیت می‌توان جهت تعیین زمان به‌روزرسانی فرآیند خطی‌سازی استفاده نمود. یعنی با توجه به این که هدف ما ردیابی متغیرهای حالت سیستم است، این خطا می‌تواند معیار مناسبی برای زمان‌های مناسب خطی‌سازی باشد. در ادامه، همان‌طور که گفته شده با توجه به این که کدگذار از اطلاعاتی که ارسال می‌کند، مدل کانال و روش کدگشایی‌ای که کدگشا به کار می‌بندد، اطلاع دارد، در هر

لحظه t می‌تواند تخمین \hat{X}_t را بر این اساس تولید کند و در بررسی‌های خود، به کار گیرد؛ لذا کدگذار به‌طور مرتب مقدار خطای $e_t = \|X_t - \hat{X}_t\|$ را با مقدار قبلی آن یعنی e_{t-1} مقایسه می‌نماید و

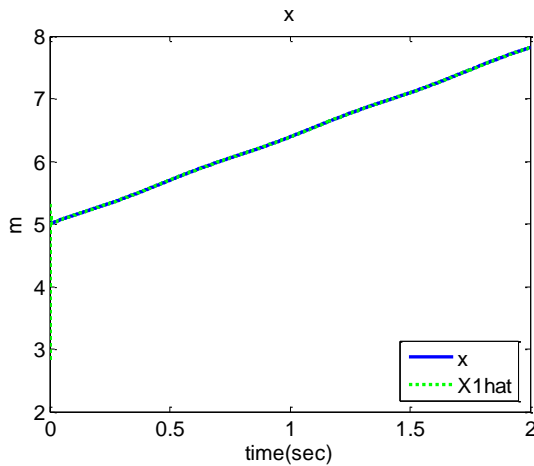
به‌محض آن که $e_t > e_{t-1}$ ، اقدام به به‌روزرسانی خطی‌سازی حول نقطه‌ی کار فعلی یعنی \hat{X}_t می‌نماید (برای انتخاب نقاط کار به جای

X_t از \hat{X}_t استفاده می‌شود تا کدگشا نیز در خطی‌سازی خود حول این نقاط، از مقدار آن‌ها اطلاع داشته باشد) و برای آن که این موضوع را به اطلاع کدگشا نیز برساند، در لحظه‌ی خطی‌سازی اقدام به ارسال تعداد بیت مناسب جدید بر اساس روش مبتنی بر مدل خطی‌سازی شده‌ی جدید (بر اساس روش مبتنی بر [۱۹]) می‌کند. اگر این تعداد بیت جدید با تعداد بیت ارسالی قبلی یکسان بود، کدگذار یک بیت داده بیش‌تر از قبل ارسال می‌نماید تا کدگشا نیز از خطی‌سازی جدید اطلاع پیدا کند و اقدام به به‌روزرسانی تنظیمات خود نماید تا با کدگذار همگرا گردد. مدل نهایی سیستم خطی‌سازی‌شده به‌صورت زیر به دست می‌آید:

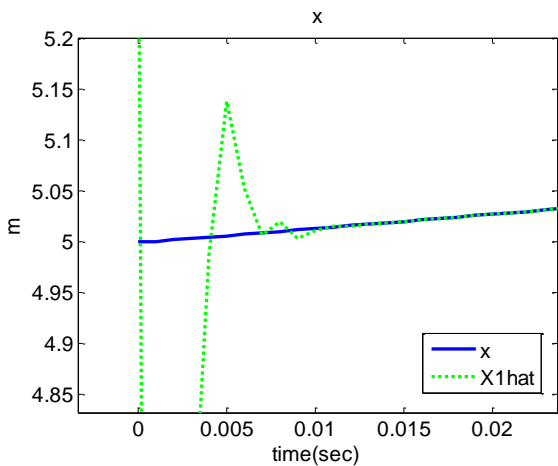
$$\begin{cases} X_{t+1} = A_0 X_t + B_0 U_t; & t \in [0, t_1), \quad X_0 = \Lambda_0 \\ X_{t+1} = A_1 X_t + B_1 U_t; & t \in [t_1, t_2) \\ \vdots \\ X_{t+1} = A_j X_t + B_j U_t; & t \in [t_j, t_{j+1}), \quad j \in N_+ \\ Y_t = X_t \end{cases} \quad (11)$$

که در آن A_j و B_j ($j \in N_+$) ماتریس‌های فضای حالت سیستم‌های خطی‌سازی شده هستند و t ها زمان‌هایی هستند که خطای ردیابی سیستم افزایش یافته و خطی‌سازی صورت گرفته است.

برای مشخص شدن کارایی الگوریتم، مقدار سیگنال کنترل متغیر با زمان در نظر گرفته می‌شود که تغییرات آن در متغیرهای حالت سیستم اثر بگذارد. در این راستا سیگنال کنترل را $u(t) = 0.01 \cos(t)$ در نظر بگیرید؛ در این صورت نتایج شبیه‌سازی تخمین بر روی این سیستم، به صورت زیر است:



شکل ۳: نمودار تغییرات متغیر حالت $x(t)$ و تخمین آن.



شکل ۴: بزرگنمایی نمودار تغییرات متغیر حالت $x(t)$ و تخمین آن.

در شکل‌های ۳ تا ۸ متغیرهای حالت سیستم و تخمین آن‌ها نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد، تخمین توانسته به خوبی متغیر حالت را دنبال کند.

خطای ردیابی مجدداً کاهش می‌یابد. بنابراین واضح است که با به‌کارگیری این استراتژی، خطای ردیابی همواره محدود می‌ماند. لیکن همانگونه که در [۳۷] نشان داده شده است، در صورتی که فرکانس این خطی‌سازی زیاد و به‌ویژه بیش‌تر از یک مقدار بحرانی باشد، در نهایت به دلیل بالا بودن فرکانس خطی‌سازی، خطای ردیابی ممکن است بی‌کران گردد. لیکن شرط (۱۲) تضمین می‌نماید که این حالت اتفاق نمی‌افتد [۳۸]. بنابراین با به‌کارگیری استراتژی توسعه یافته در این مقاله و با برقراری شرط (۱۲)، ردیابی مجانبی با احتمال یک، تضمین می‌گردد.

۴- شبیه‌سازی کامپیوتری

حال برای نشان‌دادن عملکرد کدگذار و کدگشای پیشنهادشده، دینامیک کنترل از راه دور وسایل نقلیه‌ی خودکار را در نظر بگیرید. دینامیک این سیستم‌ها، به‌صورت دینامیک با شش درجه‌ی آزادی توصیف می‌گردد که با استفاده از کنترل محلی بر روی وسیله‌ی نقلیه و روش خطی‌سازی فید‌بک و کنترل H_∞ ، مدل سیستم برای کنترل‌کننده‌ی راه دور به‌صورت مدل دینامیک تک‌سیکله به‌فرم زیر بازنویسی می‌گردد ([۳۹]):

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos \varphi(t) \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin \varphi(t) \\ \dot{\varphi}(t) = u(t) \end{cases} \quad (16)$$

که در آن $x(t)$ و $y(t)$ مختصات وسیله‌ی نقلیه، $\varphi(t)$ جهت آن، $v(t)$ سیگنال کنترل که معرف سرعت پیش‌ران و $u(t)$ نیز سیگنال کنترل دیگری است که جهت وسیله‌ی نقلیه را کنترل می‌کند. برای به‌کارگیری این مدل ابتدا، مدل به‌صورت زیر گسسته‌سازی می‌شود:

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + Tv_t \cos(\phi_t) \\ y_{t+1} = y_t + Tv_t \sin(\phi_t) \\ \phi_{t+1} = \phi_t + Tu_t \end{cases} \quad (17)$$

که در آن T نرخ نمونه‌برداری از سیستم، x_t ، y_t ، ϕ_t ، v_t و u_t به ترتیب مقادیر گسسته‌ی زمان $x(t)$ ، $y(t)$ ، $\varphi(t)$ ، $v(t)$ و $u(t)$ که

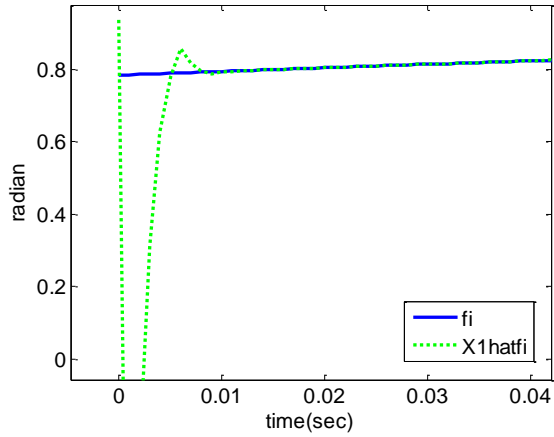
$$X_t = \begin{bmatrix} x_t & y_t & \phi_t \end{bmatrix}^T$$
 بردار متغیرهای حالت سیستم، هستند.

حال مقادیر اولیه‌ی زیر را برای این سیستم، در نظر بگیرید:

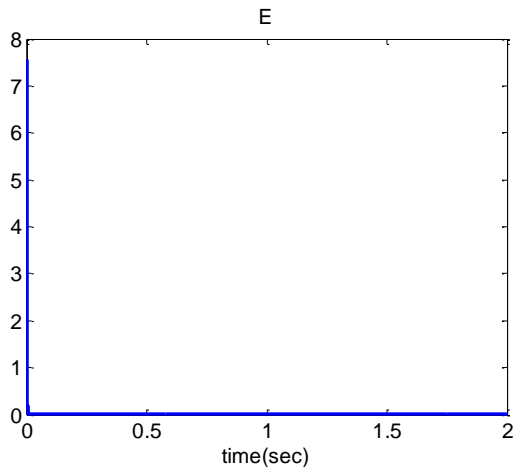
$$v(t) = 2 \text{ m/s}, \quad \varphi(0) = \frac{\pi}{4} \text{ rad}, \quad (18)$$

$$x(0) \in [-5, 5], \quad y(0) \in [-5, 5]$$

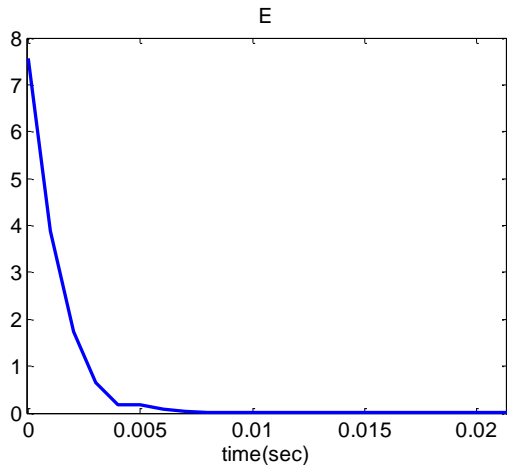
با پیاده‌سازی الگوریتم ارائه شده در قسمت قبل، نتایج زیر به‌دست می‌آید (نرخ نمونه‌برداری برای تشکیل مدل گسسته‌زمان معادل، یک میلی ثانیه است):

شکل ۸: بزرگنمایی نمودار تغییرات متغیر حالت $\varphi(t)$ و تخمین آن.

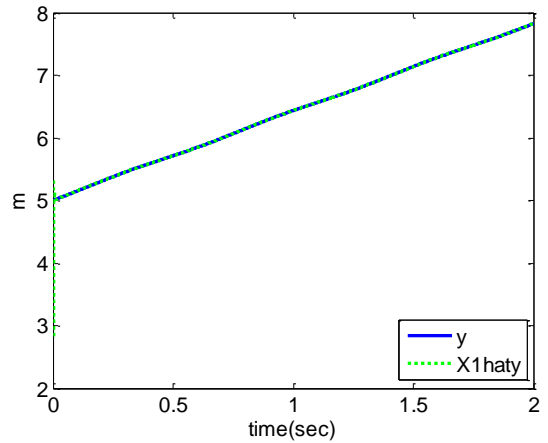
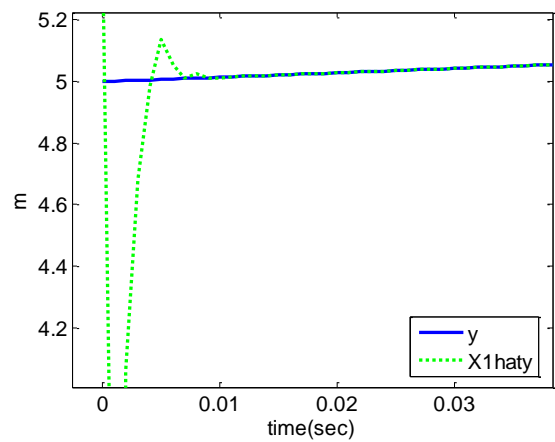
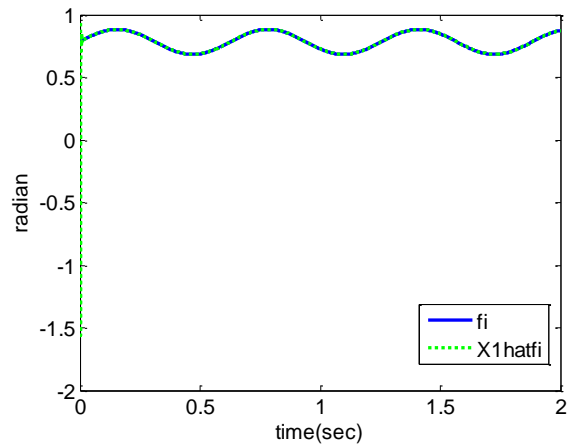
در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نیز تغییرات خطای تخمین متغیرهای سیستم، نمایش داده شده است. ملاحظه می‌گردد خطا کاهش یافته و صفر می‌شود. در شکل ۱۱ ملاحظه می‌گردد که در زمان ۵ میلی‌ثانیه به علت این که خطا افزایش یافته است، مجدداً خطی‌سازی صورت گرفته است و خطا از زمان ۵ میلی‌ثانیه به بعد مجدداً کاهش می‌یابد و نیاز به خطی‌سازی دوباره باشد.



شکل ۹: نمودار تغییرات خطای تخمین متغیرهای حالت.

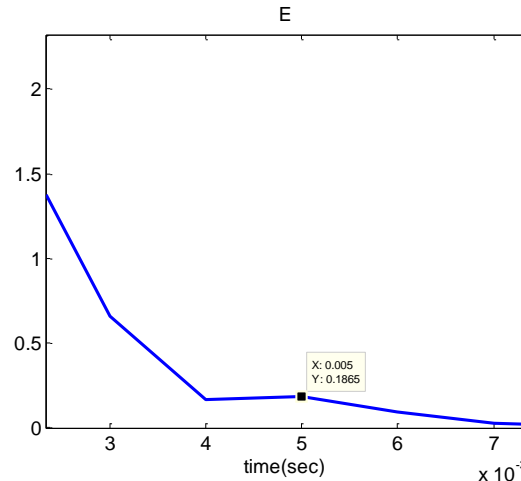


شکل ۱۰: بزرگنمایی نمودار تغییرات خطای تخمین متغیرهای حالت.

شکل ۵: نمودار تغییرات متغیر حالت $y(t)$ و تخمین آن.شکل ۶: بزرگنمایی نمودار تغییرات متغیر حالت $y(t)$ و تخمین آن.شکل ۷: نمودار تغییرات متغیر حالت $\varphi(t)$ و تخمین آن.

مراجع

- [1] D. F. Delchamps, "Stabilizing a linear system with quantized state feedback," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 35, no. 8, pp. 916-924, 1990.
- [2] W. S. Wong, and R. W. Brockett, "Systems with finite communication bandwidth constraints. I. State estimation problems," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 42, no. 9, pp. 1294-1299, 1997.
- [3] W. S. Wong, and R. W. Brockett, "Systems with finite communication bandwidth constraints. II. Stabilization with limited information feedback," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 44, no. 5, pp. 1049-1053, 1999.
- [4] A. Sahai, "Anytime information theory," Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [5] G. N. Nair and R. J. Evans, "Communication-limited stabilization of linear systems," Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, 2000.
- [6] G. N. Nair and R. J. Evans, "Mean square stabilisability of stochastic linear systems with data rate constraints," Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002.
- [7] G. N. Nair and R. J. Evans, "Stabilizability of stochastic linear systems with finite feedback data rates," SIAM Journal on Control and Optimization, vol. 43, no. 2, pp. 413-436, 2004.
- [8] G. Nair, S. Dey and R. J. Evans, "Infimum data rates for stabilising Markov jump linear systems," Proceedings. 42nd IEEE Conference on Decision and Control, 2003.
- [9] S. Tatikonda and S. Mitter, "Control over noisy channels," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49, no. 7, pp. 1196-1201, 2004.
- [10] S. Tatikonda and S. Mitter, "Control under communication constraints," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49, no. 7, pp. 1056-1068, 2004.
- [11] S. Tatikonda, A. Sahai and S. Mitter, "Stochastic linear control over a communication channel", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49, no. 9, pp. 1549-1561, 2004.
- [12] N. Elia, "When Bode meets Shannon: Control-oriented feedback communication schemes," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49, no. 9, pp. 1477-1488, 2004.
- [13] K. Li and J. Baillieul, "Robust quantization for digital finite communication bandwidth (DFCB) control," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49, no. 9, pp. 1573-1584, 2004.
- [14] N. C. Martins, M. A. Dahleh and N. Elia, "Feedback stabilization of uncertain systems in the presence of a direct link," IEEE Transactions on Automatic Control, pp. 438-447, 2006.
- [15] P. Minero, L. Coviello and M. Franceschetti, "Stabilization over Markov feedback channels: the general case", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 58, no. 2, pp. 349-362, 2013.
- [16] C. D. Charalambous and A. Farhadi, "LQG optimality and separation principle for general discrete time partially observed stochastic systems over finite capacity communication channels," Automatica, vol. 44, no. 12, pp. 3181-3188, 2008.
- [17] G. N. Nair, et al., "Topological feedback entropy and nonlinear stabilization", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 49, no. 9, pp. 1585-1597, 2004.
- [18] D. Liberzon and J. P. Hespanha, "Stabilization of nonlinear systems with limited information feedback," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 50, pp. 910-915, 2005.
- [19] S. Tatikonda, "Some scaling properties of large distributed control systems", Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, 2003.
- [20] A. S. Matveev and A. V. Savkin, "Stabilization of multisensor networked control systems with communication constraints", 5th Asian Control Conference, 2004.
- [21] G. N. Nair, R. J. Evans and P. E. Caines, "Stabilising decentralised linear systems under data rate constraints", The 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004.



شکل ۱۱: بزرگنمایی بیشتر نمودار تغییرات خطای تخمین متغیرهای حالت به همراه علامت زمان خطی سازی.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، با در نظر گرفتن دینامیک های غیرخطی و به طور ویژه دینامیک پهبادهای مینیاتوری یا اتومبیل های خودکار به صورت مدل تک سیگله و سپس اعمال روش خطی سازی مناسب، به طراحی کدگذار و کدگشای مناسب پرداخته شد. کدگذار و کدگشای مناسب، جهت ردیابی مسیر حالت این سیستم های غیرخطی، توسط تخمین زندهی راه دور، استفاده شدند؛ زیرا در این سیستم، اندازه گیری ها از طریق کانال مخابراتی با بهره گیری از کمترین ظرفیت انتقال ممکن، به این تخمین زنده ارسال می گردد. خطی سازی ها هنگامی که خطای تخمین متغیرهای حالت سیستم افزایش می یابد، صورت گرفت و در صورت کاهش خطای تخمین از خطی سازی صورت گرفته در مرحله قبل استفاده شد. با استفاده از شبیه سازی های کامپیوتری عملکرد کدگذار و کدگشای که بدین صورت طراحی می شود، در ردیابی متغیرهای حالت دینامیک تک سیگله نشان داده شد.

با استفاده از این تخمین می توان کنترل کننده مناسب کنترل از راه دور برای این سیستم ها طراحی نمود و پایدارسازی سیستم کنترل از راه دور را نتیجه گرفت که این موضوع در تحقیقات آتی دنبال می گردد. علاوه بر این، در صورتی که فاصله ی وسیله ی نقلیه از مرکز کنترل زیاد شود، به دلیل ضعیف تر شدن سیگنال ارسالی از وسیله ی نقلیه به گیرنده راه دور، تعدادی از داده های اندازه گیری شده به دلیل قوی شدن اثر نویز، به طور تصادفی و با احتمال α از دست می روند. برای این مسئله، کانال مخابراتی از نوع محک بسته ای^۸ با ظرفیت محدود مناسب است که با انجام تغییراتی در روش کدگذاری ارائه شده در این مقاله و استفاده از ایده ی روش کدگذاری که برای سیستم های خطی در مرجع [۹] برای کانال های محک بسته ای ارائه شده است و به شرط آنکه در رابطه ی (۱۵)، R_j با $(1-\alpha)R_j$ جایگزین گردد، انتظار می رود که ردیابی مسیرهای حالت سیستم غیرخطی میسر گردد که این موضوع در تحقیقات آتی دنبال می گردد.

Index	-۶
Dwell time	-۷
Packet erasure channel	-۸

[۲۲] علوی، بیات، «ارسال تصویر از طریق سیستمهای چند ورودی چند خروجی با تخصیص توان ارسالی نامتقارن»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۰، شماره ۴، صفحات ۱۳۹-۱۵۲، زمستان ۱۳۹۴.

- [23] A. Farhadi and N. Ahmed, "Tracking nonlinear noisy dynamic systems over noisy communication channels", IEEE Transactions on Communications, vol. 59, no. 4, pp. 955-961, 2011.
- [24] C. D. Charalambous, A. Farhadi and S. Z. Denic, "Control of continuous-time linear Gaussian systems over additive Gaussian wireless fading channels: A separation principle", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 53, no. 4, pp. 1013-1019, 2008.
- [25] L. Schenato, et al., "Foundations of control and estimation over lossy networks". Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 163-187, 2007.
- [26] V. Gupta, B. Hassibi and R. M. Murray, "Optimal LQG control across packet-dropping links," Systems & Control Letters, vol. 56, no. 6, pp. 439-446, 2007.
- [27] J. Nilsson, B. Bernhardsson and B. Wittenmark, "Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays", Automatica, vol. 34, no. 1, pp. 57-64, 1998.
- [28] J. Nilsson, "Real-time control systems with delays", Ph.D Thesis, Lund Institute of Technology Lund, Sweden, 1998.
- [29] M. Yu, et al., "Stabilization of networked control systems with data packet dropout via switched system approach", IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, 2004.
- [30] P. Seiler and R. Sengupta, "An H_∞ approach to networked control", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 50, no. 3, pp. 356-364, 2005.

[۳۱] لاری، «تخصیص منابع جهت کمینه‌سازی تأخیر ارسال در سامانه‌های مخابراتی تغذیه‌شونده به صورت بی سیم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، انتشار آنلاین از فروردین ۱۳۹۶.

[۳۲] رستگاریا، خلیلی و یوسفی رضایی، «الگوریتم مبتنی بر شبکه تطبیقی نفوذی برای تخمین مقاوم میدان اسکالر در شبکه‌های سنسوری بی سیم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۷۴، شماره ۲، صفحات ۵۲۷-۵۳۵، تابستان ۱۳۹۶.

- [33] N. Elia and J.N. Eisenbeis, "Limitations of linear remote control over packet drop networks", The 43rd IEEE Conference on Decision and Control, 2004.
- [34] N. Elia and J.N. Eisenbeis, "Limitations of linear control over packet drop networks," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 56, no. 4, pp. 826-841, 2011.
- [35] D. Quevedo and I. Jurado, "Stability of sequence-based control with random delays and dropouts," IEEE Transactions on Automatic Control, pp. 1296-1302, 2014.
- [36] B. Tavassoli, "A continuous-time approach to networked control of nonlinear systems", The 50th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, Florida, USA, 2011.
- [37] H. Lin and P.J. Antsaklis, "Stability and stabilizability of switched linear systems: A survey of recent results", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 54, no. 2, pp. 308-322, 2009.
- [38] G. Zhai, B. Hu, K. Yasuda and A.N. Michel, "Qualitative analysis of discrete-time switched systems", Proceedings of the American Control Conference, pp. 1880-1885, 2002.
- [39] A. Farhadi, J. Domun and C. Canudas de Wit, "A supervisory control policy over an acoustic communication network", International Journal of Control, vol. 88, no. 5, pp. 946-958, 2015.

زیرنویس‌ها

Unicycle model	-۱
Encoder	-۲
Decoder	-۳
Packet	-۴
Almost sure	-۵