

پایدارسازی یک سیستم کنترل شده از طریق شبکه در حضور پدیده از دست رفتن

بسته‌های اطلاعاتی

هومن صنعتی زاده^۱، جواد پشتان^۲

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

hosai18@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران

jposhtan@iust.ac.ir

چکیده: در این مقاله پس از معرفی سیستم های کنترل تحت شبکه و مروری بر ساختار آن و همچنین، معرفی چالش از دست رفتن بسته های اطلاعاتی، ابتدا به معرفی روشی مبنی بر پایدارسازی سیستم های کنترل تحت شبکه در حضور پدیده از دست رفتن بسته های اطلاعاتی پرداخته شده است. در این روش پدیده از دست رفتن بسته ها در هر دو مسیر سنسور/کنترل کننده و کنترل کننده/عملگر و پدیده از دست رفتن بسته ها در هر دو مسیر به صورت دو تاخیر در نظر گرفته شده و سیستم به سیستمی خطی پرشی به همراه دو مد تبدیل و با استفاده از قضایای حاکم بر سیستم های خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف تئوری پایداری ارائه شده است. تئوری ارائه شده در قالب معادلات LMI بیان گردیده است. سپس با استفاده از این روش و بر طبق تئوری ارائه شده، یک سیستم آونگ معکوس که از طریق شبکه با کنترل کننده در ارتباط است، در حضور پدیده از دست رفتن بسته های اطلاعاتی پایدار شده است.

واژه‌های کلیدی: بسته های اطلاعاتی، پایدارسازی، سیستم های خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف، سیستم های کنترل تحت شبکه (Networked Control Systems).

۱- مقدمه

چشمگیر دنیای دیجیتال، حضور گسترده شبکه‌هایی نظیر: اینترنت، اینترنت و...، نیاز به سیستم های کنترل تحت شبکه را در دنیای امروزی دو چندان می کند. سیستم‌های کنترل تحت شبکه، سیستم هایی بوده که اجزای آن با فاصله از هم توزیع شده، و ارتباط بین سنسورها، محرک‌ها و کنترل کننده ها از طریق یک شبکه ارتباطی صورت می‌گیرد (شکل ۱) [۱].

این شبکه ارتباطی، می تواند به صورت شبکه ارتباطی سیمی (که امروزه اکثر بدین صورت است) و یا شبکه ارتباطی دیجیتال (که شامل انواع سیستم های بی سیم است) باشد. سیستم های کنترل، در مقیاس های بزرگ و کوچک شامل سنسورها، محرک ها و متغیرهای فرایند داخلی هستند. برای اتصال اجزای مختلف این سیستم‌ها، به طور

در صنعت امروزی دقت خوب و قابل قبول سیستم، انتقال سریع اطلاعات، پایداری و در نهایت، عملکرد مناسب سیستم، از جمله مزیت هایی است که به دنبال آن هستیم. از طرفی، هزینه های نصب و نگهداری بالا و حجم زیاد سیم کشی در سیستم های امروزی (که خود سرچشمه بسیاری از مشکلات است) از یک سو، و از سویی دیگر پیشرفت

^۱ تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۱/۷/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله : -/ -/ ۱۳۹۱

نام نویسنده مسؤول : هومن صنعتی زاده

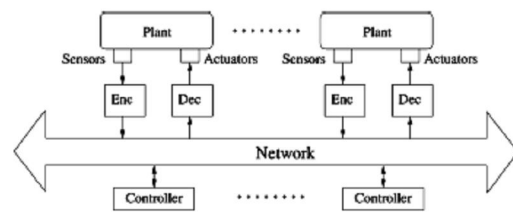
نشانی نویسنده مسؤول : ایران - تهران - دانشگاه علم و صنعت

ایران - دانشکده مهندسی برق

قابلیت اطمینان و مقاومت زیادی برای اهداف کنترلی real-time دارند [۴،۵]. در همین هنگام، تکنولوژی در میان شبکه‌های کامپیوتری، نظیر Ethernet به سرعت پیشرفت کرد. با کاهش قیمت، افزایش سرعت و کاربرد وسیع، این شبکه‌ها، رقبای جدی برای شبکه‌های صنعتی (در زمینه‌های کنترلی) به حساب آمدند. با معرفی اینترنت، این شبکه‌ها شهرت بیشتری یافتند. در نتیجه، کاربردهای کنترلی توانست NCS را برای اتصال به اینترنت، برای اجرای عملیات کنترلی حتی در فواصل دور به کار برد [۶،۷].

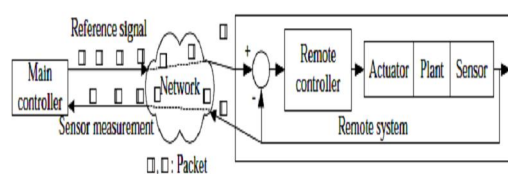
با چشم‌پوشی از نوع شبکه به کار گرفته شده، عملکرد NCS همواره تحت تأثیر تأخیرهای شبکه است. همواره تأخیر را به عنوان عاملی مضر در کاهش عملکرد سیستم می‌شناسیم. تأخیر معمولاً در سیستم حلقه باز تأثیر چندانی ندارد، اما از طرفی همان طور که می‌دانیم، سیستم حلقه باز چندان در کاربردهای کنترلی سودمند نیست؛ مثلاً در سیستم‌هایی نظیر روبات و جراحی از راه دور، نیازمند سیستم فیدبک‌دار هستیم تا بتوانیم خروجی را به راحتی اصلاح کنیم [۸،۹]. همان‌گونه که پیشتر هم اشاره شد، چند دهه ای است که تکنولوژی شبکه داده به طور گسترده در سیستم‌های کنترلی صنعتی به کار گرفته شده است. اتصال اجزای یک سیستم کنترلی (سنسور، کنترل کننده و محرک) از طریق یک شبکه، می‌تواند به طور چشمگیری از پیچیدگی‌های سیستم کاسته، صرفه اقتصادی را به همراه داشته باشد. علاوه بر مزایایی، نظیر: نصب آسان، کاهش پیچیدگی سیستم و دیگر مزایایی که بدان اشاره شد، اتصال فضای مجازی به فضای فیزیکی، دیگر مزیتی است که امکان دسترسی آسان و کنترل از راه دور را ایجاد می‌کند. این‌گونه سیستم‌ها امروزه بیش از پیش به واقعیت نزدیک شده و پتانسیل‌های کاربردی زیادی از خود نشان داده‌اند، که در این میان می‌توان به کاوش‌های فضایی، کاوش‌های زمینی، خودکارسازی کارخانه، پیدا کردن خطا و عیب‌یابی پیشرفته، نظارت بر کارخانجات تولیدی به صورت خودکار، مراقبت‌های خودکار در بیمارستان‌ها، Tele-robotic، کنترل از راه دور و جراحی از راه دور [۳]، به عنوان مثال-هایی از کاربردهای آن نام برد.

سنی از کابل سیمی استفاده می‌شود. البته، این وسایل همان‌گونه که گفته شد، مشکلات مخصوص به خود را دارند (مخصوصاً در مناطقی که دسترسی اولیه به آن مشکل است و یا مناطق خطرناک). از طرفی هم، گران قیمت (بنا به موادی که از آن ساخته شده‌اند) و جاگیر (به خاطر نیاز به و ایجاد کننده خطا (به خاطر استهلاک یا قطع سیم‌ها) هستند. همچنین، هزینه‌های نصب و نگهداری این سیستم‌ها هم کم نیست. به همین خاطر است که طی چند دهه اخیر، شبکه‌های ارزان قیمت و قابل اطمینان دیجیتال (که یکی از انواع آن بی سیم است) به عنوان روش عملی در کاهش این مشکلات، در سیستم‌های اتوماسیون به کار گرفته شده‌اند [۱].



شکل (۱): شماره کلی سیستم کنترل تحت شبکه [۱]

در سمت دیگر، این گونه شبکه‌ها به واسطه انعطافی که از خود نشان می‌دهند، در محدوده وسیعی از کاربردها نظیر: شبکه‌های حسگر موبایل [۲]، جراحی از راه دور [۳]، همکاری از راه حواس از طریق اینترنت، و ... استفاده می‌شوند که در ادامه به کاربردهای دیگر آن نیز اشاره خواهیم کرد. به واسطه چنین مزایایی، بسیاری از کمپانی‌های صنعتی نسبت به در اختیار گرفتن شبکه‌ها علاقه زیادی نشان داده‌اند. به همین خاطر، پروتکل‌های شبکه‌ای جدیدی معرفی شده‌اند که در این میان، می‌توان به CAN اشاره کرد که در سال ۱۹۸۳ توسط کمپانی بوش آلمان در صنعت ماشین به کار گرفته شد و امروزه هم در بسیاری از صنایع کاربرد دارد. از دیگر مثال‌های شبکه‌های صنعتی می‌توان به Profibus اشاره کرد. Profibus پروتکلی است که تحت سیستم چند master/slave کار می‌کند. در همین برهه از زمان، دیگر پروتکل‌ها نظیر: Foundation Fieldbus و Device Net هم توسعه یافتند که اکثر این پروتکل‌ها



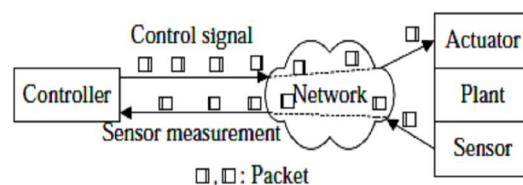
شکل (۳): ساختار سلسله مراتبی [۱۰]

علاوه بر مزایای ذکر شده در مورد سیستم‌های کنترل تحت شبکه، از سویی دیگر قرار دادن شبکه ارتباطی در داخل حلقه کنترلی طراحی و آنالیز سیستم را دشوار می‌سازد. از جمله این دشواری‌ها می‌توان تحلیل و طراحی در حضور تاخیر و از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی، نمونه برداری این نوع از داده‌ها و ... را نام برد. به همین دلیل است که امروزه این شاخه از کنترل یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مهندسان کنترلی به شمار می‌آید. در یک سیستم *NCS* علاوه بر مبحث تاخیر، از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی یکی از مهمترین چالش‌های این نوع از شبکه‌هاست.

در رویارویی با چالش از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی، مسیر از دست رفتن بسته‌ها، نحوه رفتار اجزای سیستم کنترلی از قبیل سنسور و کنترل کننده و عملگر، نحوه انتقال داده‌ها به صورت تک پکتی و چند پکتی و حضور یا عدم حضور نویز، در نحوه رویارویی با این پدیده در سیستم‌های کنترل تحت شبکه تاثیرگذار خواهد بود. به همین دلیل است که روش‌های مقابله با چالش از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی در مقالات با یکدیگر تفاوت داشته و هریک به طریقی با این چالش مواجه شده‌اند. از سویی دیگر، نحوه مدل کردن بسته‌های اطلاعاتی نیز باعث همین تفاوت در تحلیل‌ها شده است. پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی در سیستم کنترل تحت شبکه پدیده‌ای تصادفی و محدود است. تعداد بسته‌های از دست رفته داخل یک سیستم هیچ‌گاه از مقداری معین تجاوز نکرده و بهترین روش مدل کردن آن، روش حلقه مارکف است، چرا که حلقه مارکف به خوبی بیانگر رفتار از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی در سیستم است. سیستم کنترل تحت شبکه با لحاظ از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی با سیستم‌های دینامیکی غیرهمگام نیز مدل شده‌اند [۱۱]. در

در حالت کلی، دو نوع ساختار از سیستم‌های کنترل تحت شبکه وجود دارد که عبارتند از:

در ساختار مستقیم *NCS* از یک کنترل کننده و یک سیستم از راه دور شامل پلنت، سنسور و محرک تشکیل شده است. کنترل کننده و پلنت در کل با فاصله از یکدیگر قرار گرفته‌اند و از طریق یک شبکه داده با یکدیگر در ارتباط هستند (شکل ۲). سیگنال کنترلی در قالب بسته‌های اطلاعاتی در طول شبکه انتقال می‌یابد. سپس پلنت، خروجی سیستم را از طریق اندازه‌گیری‌هایی که توسط سنسورها انجام گرفته، در قالب بسته‌های اطلاعاتی به کنترل کننده می‌فرستد. برخی از مثال‌های ساختار مستقیم، آموزش از راه دور و کنترل سرعت موتور *DC* است، چراکه در این گونه سیستم‌ها کنترل کننده در یک سمت، و سیستم ما در سمتی دیگر جدای از هم از طریق شبکه با یکدیگر در ارتباط هستند.



شکل (۲): ساختار مستقیم [۱۰]

ساختار سلسله مراتبی از یک کنترل کننده اصلی و یک سیستم حلقه بسته از راه دور تشکیل شده است. شکل (۳) به طور متناوب، کنترل کننده اصلی سیگنال مرجع را محاسبه کرده، در قالب بسته‌هایی از طریق شبکه به سیستم از راه دور می‌فرستد. سپس این سیستم از راه دور روی سیگنال مرجع فرآیندهایی را به منظور کنترل حلقه بسته محلی و فرستادن مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنسور به کنترلر اصلی برای کنترل حلقه بسته شبکه، انجام می‌دهد. کنترل حلقه بسته معمولاً دوره نمونه برداری طولانی‌تری نسبت به کنترل حلقه محلی دارد. کاربرد گسترده این ساختار در *Tele-operation* و *mobile robot* [۱] است. شایان ذکر است که به کارگیری ساختار مستقیم، یا سلسله مراتبی بسته به نوع کاربرد و نیاز طراح متفاوت است.

شده با حلقه مارکف در حضور تاخیر، تبدیل می‌کند. سپس به منظور ارزیابی روش مورد مطالعه قرار گرفته یک آونگ برگشتی که در [۱۸] در حضور پدیده تاخیر و تحت شبکه کنترل شده است، این بار در حضور پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی و از طریق روش مورد مطالعه قرار گرفته پایدار شده است، تا نشان داده شود که می‌توان پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی را با تاخیر مدل نمود و از نتایج حاکم بر MJLS ها استفاده کرد.

۲- مدل‌سازی و تحلیل پایداری سیستم کنترل تحت شبکه با لحاظ از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی در حالت انتقال تک پاکتی با حضور ماتریس انتقال معلوم

در ادامه، به تحلیل سیستم‌های کنترل شبکه در حضور پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی، پرداخته خواهد شد. در روشی که بررسی شده است، ابتدا مدلی برای از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی تعریف می‌گردد. سپس صورت مساله به صورتی بیان می‌گردد که سیستم کنترل تحت شبکه در حضور پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی یک سیستم خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف در نظر گرفته شده و پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی به تأخیر در مسیرهای سنسور/کنترل کننده و کنترل کننده/عملگر تبدیل می‌شود.

۲-۱- بیان صورت مساله [۱۷]

شمایی از سیستم کنترل تحت شبکه با لحاظ از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی در شکل (۱) مشاهده می‌شود. در این شکل سنسور، کنترل کننده و عملگر به صورت clock-driven عمل می‌کنند. پلنتی که در اینجا در نظر می‌گیریم خطی و نا متغیر با زمان بوده، چنین تعریف می‌شود:

$$x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u(k) \quad (1)$$

در این سیستم $x(k)$ حالت سیستم و $u(k)$ بردار ورودی است، و Γ و Φ ماتریس‌های معلوم با ابعاد مناسب هستند. در این سیستم فرض بر این است که بافرها قابلیت

[۱۲] سیستم کنترل تحت شبکه با لحاظ از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی محدود، از طریق سیستم سوئیچینگ مدل شده است و روشی بازگشتی در مدل‌سازی این سیستم‌ها با سیستم سوئیچینگ در [۱۳] ارائه شده است، اما مشکل این مقاله در نظر گرفتن پدیده از دست رفتن بسته‌ها در مسیر سنسور/کنترل کننده است و از وقوع این پدیده در مسیر کنترل کننده/عملگر صرف نظر شده است. در [۱۴] پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی با حلقه مارکف مدل شده و تخمین‌گر خطی پرشی به منظور بهبود سیستم ارائه شده است. اگرچه بنا بر تصادفی بودن پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی اکثر مقالات به روز دنیا توجه خود را به مدل‌سازی سیستم‌های کنترل تحت شبکه با فرآیند حلقه مارکف معطوف کرده‌اند، اما در اکثر این مقالات ماتریس انتقال فرآیند حلقه مارکف کاملاً از قبل دانسته شده فرض شده است. به همین دلیل، در سال‌های اخیر روش‌هایی به منظور تخمین نامعینی‌های ماتریس انتقال ارائه شده است. در [۱۶، ۱۵] به خوبی با چالش تاخیر مواجه شده و به تحلیل پایداری و طراحی کنترل کننده حتی در حالت مقاوم پرداخته‌اند. با توجه به این موضوع، یکی از روش‌های مقابله با چالش از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی در سیستم‌های کنترل تحت شبکه، مدل‌سازی پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی به شکل تاخیر و استفاده از نتایج به دست آمده در مقالات تحلیل پایداری سیستم‌های خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف به همراه تاخیر است. در [۱۷] پدیده از دست رفتن بسته‌ها، به صورت تاخیر مدل شده و سیستم به یک سیستم خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف تبدیل شده است. در ادامه و با توجه به نتایج سیستم‌های مارکف، تحلیل پایداری و طراحی کنترل کننده انجام گرفته است. در این مقاله روش مدل‌سازی پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی به وسیله پدیده تاخیر و استفاده از نتایج حاصل از سیستم‌های خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف در پایدارسازی سیستم‌های کنترل تحت شبکه مطالعه شده است. به عبارت دیگر، نشان داده شده است که در سیستم‌های کنترل تحت شبکه، مدل‌سازی پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی با پدیده تاخیر سیستم را به یک سیستم خطی پرشی مدل

نمی توان راهکار انتقال تک پکتی را در این شبکه به کار گرفت و داده ها باید به صورت چندپکتی در طول شبکه انتقال پیدا کنند. اینجاست که تحلیل سیستم کنترل تحت شبکه با لحاظ از دست رفتن داده ها در دو صورت تک پکتی و چند پکتی اهمیت می یابد. در این مقاله بنابر محدودیت های موجود تنها تحلیل در حالت تک پکتی صورت گرفته است.

۲-۲- مدل سازی سیستم کنترل تحت شبکه با

لحاظ از دست رفتن بسته های اطلاعاتی در

حالت انتقال تک پکتی [۱۷]

به منظور مدل سازی سیستم کنترل تحت شبکه با لحاظ از دست رفتن بسته های اطلاعاتی در حالت انتقال تک پکتی، از دست رفتن بسته های اطلاعاتی در هر دو مسیر سنسور به کنترل کننده و کنترل کننده به عملگر در نظر گرفته شده است. d_k^{ca} بیانگر تعداد بسته های از دست رفته در مسیر کنترل کننده به عملگر از زمان آخرین انتقال موفق (زمان $k - d_k^{ca}$) تا زمان k بوده و d_k^{sc} بیانگر تعداد بسته های از دست رفته در مسیر سنسور به کنترل کننده از زمان آخرین انتقال موفق (در زمان $k - d_k^{sc}$) تا زمان k است. تعداد بسته های از دست رفته نیز بنا بر ماهیت مساله محدود در نظر گرفته شده اند.

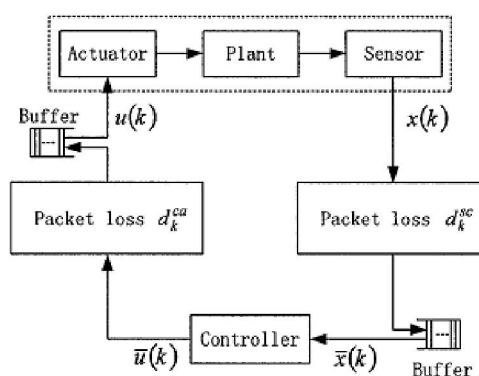
$$0 \leq d_k^{sc} \leq d_1, 0 \leq d_k^{ca} \leq d_2$$

از طرفی، به خاطر ماهیت تصادفی بودن پدیده از دست رفتن بسته ها، d_k^{ca} و d_k^{sc} به صورت حلقه مارکف مدل شده اند که به ترتیب مقادیری در محدوده $S_2 = \{0, 1, \dots, d_2\}$ ، $S_1 = \{0, 1, \dots, d_1\}$ می گیرند. احتمال انتقال d_k^{sc} (احتمال پرش از مد i به j) توسط ρ_{ij} و احتمال انتقال d_k^{ca} (احتمال پرش از مد m به n) توسط λ_{mn} نمایش داده شده و بدین صورت تعریف می گردد.

$$\rho_{ij} = \Pr(d_{k+1}^{sc} = j | d_k^{sc} = i), \lambda_{mn} = \Pr(d_{k+1}^{ca} = n | d_k^{ca} = m) \quad (2)$$

طبق خواص احتمال واضح است که:

دریافت تمام بسته های اطلاعاتی را داشته و آنها را به صورت منظم، از اولین بسته تا آخرین بسته دریافت شده می چینند. برای مثال، اگر بسته اطلاعاتی $x(k)$ که از سنسور فرستاده شده است از بین برود، تازه ترین بسته رسیده قبل از $x(k)$ ؛ یعنی $x(k-1)$ از بافر استخراج شده به عنوان $\bar{x}(k)$ برای محاسبه سیگنال کنترلی به کار گرفته می شود؛ در غیر این صورت همان سیگنال $x(k)$ به عنوان $\bar{x}(k)$ به کار گرفته می شود. پس برای بافر داریم:



شکل (۴): سیستم کنترل تحت شبکه با لحاظ از دست رفتن

بسته های اطلاعاتی و فیدبک حالت [۱۷]

$$u_k = \begin{cases} \bar{u}_k & \text{if transmitted successfully} \\ u_{k-1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\bar{x}_k = \begin{cases} x_k & \text{if transmitted successfully} \\ \bar{x}_{k-1} & \text{otherwise} \end{cases}$$

از طرفی، بنا به محدودیت های پهنای باند و سایر بسته های اطلاعاتی از طرف شبکه، انتقال به دو صورت تک پکتی و چند پکتی انجام می پذیرد. حضور بافر در سیستم روند طراحی و مدل سازی را تغییر خواهد داد که این روند در ادامه مشاهده خواهد شد. در ادامه مدل سازی و تحلیل پایداری برای حالت انتقال تک پکتی بیان می گردد. قبل از پرداختن به این مساله به موارد استفاده از انتقال تک پکتی و چند پکتی می پردازیم. شبکه های متفاوتی برای استفاده از هریک از این حالات مناسب هستند؛ برای مثال، شبکه Ethernet قابلیت نگهداری حداکثر ۱۵۰۰ بایت را در یک بسته اطلاعاتی داراست [۱۷] و انتقال داده به صورت تک پکتی برای این نوع شبکه بسیار مناسب خواهد بود. شبکه Devicenet قابلیت نگهداری حداکثر ۸ بایت اطلاعات را در قالب یک بسته ای اطلاعاتی داشته [۱۷] و به همین دلیل

$$z(k+1) = \begin{bmatrix} \Phi & \Gamma\alpha(d_k^{ca}) \\ 0 & \alpha(d_k^{ca}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1-\alpha(d_k^{ca}))\Gamma F(d_k^{sc}) & 0 \\ (1-\alpha(d_k^{ca}))F(d_k^{sc}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k-d_k^{sc}) \\ u(k-d_k^{sc}-1) \end{bmatrix} \quad (۸)$$

$$= A(d_k^{ca})z(k) + B(d_k^{ca}, d_k^{sc})z(k-d_k^{sc})$$

سیستم حلقه بسته به دست آمده یک سیستم خطی پرشی با دو مُد است و تاخیر d_k^{sc} را نیز در خود دارد. مقادیر انتقال این دو مُد توسط حلقه مارکف مدل شده است و به همین دلیل برای تحلیل آن از نتایج MJLS به همراه تاخیر استفاده خواهد شد. ایده اصلی این روش مدل‌سازی سیستم کنترل تحت شبکه به گونه ای است که بتوان نتایج حاصل از سیستم های خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف را برای این دسته از سیستم های کنترلی پیاده سازی نمود؛ چرا که با توجه به تحقیقات وسیع انجام گرفته بر روی سیستم های خطی پرشی، استفاده از نتایج آن برای دیگر سیستم ها علاوه بر کاهش حجم محاسبات، اطمینان از صحت نتایج را به همراه دارد. از طرفی، استقلال سیستم حلقه بسته از تعداد بسته های از دست رفته و وابستگی آن به حضور یا عدم حضور بسته ها از دیگر مزایای این روش است.

۲-۳- تحلیل پایداری و طراحی کنترل کننده برای سیستم کنترل تحت شبکه با لحاظ از دست رفتن بسته های اطلاعاتی در حالت انتقال تک پکتی

در ادامه و به منظور تحلیل پایداری و طراحی کنترل کننده برای سیستم های کنترل تحت شبکه با لحاظ از دست رفتن بسته های اطلاعاتی، با توجه به مباحث فوق و با استفاده از نتایج سیستم های خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف تئوری زیر ارائه شده است.

تئوری [۱۷]

سیستم تعریف شده در (۸) به صورت تصادفی پایدار است اگر ماتریس های $X_{i,m} > 0$ ، $Q > 0$ و $\Psi_{i,m}$ وجود داشته باشند؛ به گونه‌ای که LMI زیر برای

$$\sum_{j=1}^{d_1} p_{ij} = 1, \quad \sum_{m=1}^{d_2} \lambda_{mn} = 1, \quad (۳)$$

در ادامه قانون کنترلی این گونه به دست خواهد آمد:

$$\bar{u}(k) = F(d_k^{sc})\bar{x}(k) \quad (۴)$$

که $F(d_k^{sc})$ کنترل کننده ای است که بر اساس از دست رفتن بسته ها در مسیر سنسور به کنترل کننده طراحی می‌شود. پس سیستم حلقه بسته بدین صورت خواهد بود:

$$x_{k+1} = \begin{cases} \Phi x_k + \Gamma F(d_k^{sc}) \bar{x}_k & \text{if } d_k^{ca} = * \\ \Phi x_k + \Gamma u_{k-1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۵)$$

در این روش به منظور ساده سازی، تابعی با نام $\alpha(\cdot)$ بدین صورت تعریف شده است. [۱۷]

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + \alpha(d_k^{ca})\Gamma u(k-1) \\ &+ [1-\alpha(d_k^{ca})]\Gamma F(d_k^{sc})x(k-d_k^{sc}), \quad (۶) \\ u(k) &= \alpha(d_k^{ca})u(k-1) + [1-\alpha(d_k^{ca})]F(d_k^{sc})x(k-d_k^{sc}), \end{aligned}$$

که

$$\alpha(d_k^{ca}) = \begin{cases} 1, & d_k^{ca} > * \\ 0, & d_k^{ca} = * \end{cases} \quad (۷)$$

مزیت این روش مدل‌سازی حلقه بسته، ساده بودن مدل است، چراکه اگر مقدار $d_k^{ca} > 0$ باشد، سیگنال کنترلی بدون توجه به تعداد بسته های اطلاعاتی از دست رفته در مسیر کنترل کننده- عملگر مقدار قبلی را به خود خواهد گرفت و در واقع نیازی به تعریف متغیر d_k^{ca} در بردار حالت، برای طراحی کنترل کننده نخواهد بود. به بیانی دیگر مدل‌سازی حلقه بسته تنها وابسته به این موضوع خواهد بود که آیا از دست رفتن بسته های اطلاعاتی رخ داده است یا خیر. در ادامه مقاله و به منظور رسیدن به فرم سیستم حلقه بسته، بردار $z(k) = [x^T(k) \quad u^T(k-1)]^T$ تعریف شده است و برای سیستم کنترل تحت شبکه با لحاظ از دست رفتن بسته های اطلاعاتی در حالت انتقال تک پکتی، سیستم حلقه بسته بدین شکل در آمده است. [۱۷]

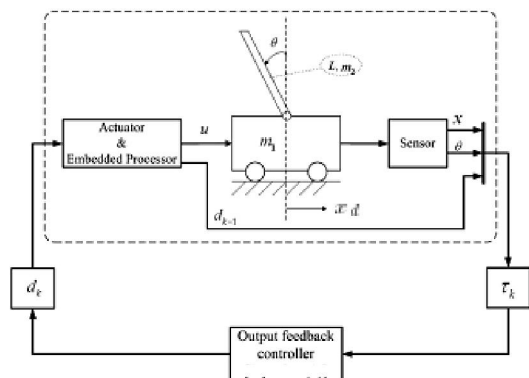
تمام $m, n \in S_2$ و $i, j \in S_1$ برقرار باشد.

گرفته شده بدون اصطکاک بوده، پارامترهای سیستم از این قرار است: [۱۸]

جرم ارابه $(m_1) = ۱$ کیلوگرم، جرم آونگ $(m_2) = ۰.۵$ کیلوگرم، طول آونگ برگشتی $(L) = ۰.۱$ متر. دینامیک گسسته سیستم با زمان نمونه برداری ۰.۱ ثانیه عبارت است از:

$$A_d = \begin{bmatrix} ۱.۰۰۰۰ & ۰.۱۰۰۰ & -۰.۰۱۶۶ & -۰.۰۰۰۰ \\ ۰.۰۰۰۰ & ۱.۰۰۰۰ & -۰.۳۳۷۴ & -۰.۰۱۶۶ \\ ۰.۰۰۰۰ & ۰.۰۰۰۰ & ۱.۰۹۶۶ & ۰.۱۰۳۳ \\ ۰.۰۰۰۰ & ۰.۰۰۰۰ & ۲.۰۲۴۷ & ۱.۰۹۶۶ \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} ۰.۰۰۰۰ \\ ۰.۰۸۹۶ \\ -۰.۰۰۶۸ \\ -۰.۱۳۷۷ \end{bmatrix}$$



شکل (۵): سیستم آونگ برگشتی کنترل شده تحت شبکه [۱۸]

مقادیر ویژه سیستم عبارتند از: ۱.۰۵۵۶۹ و ۰.۶۴۲۳ . پس سیستم گسسته فوق نا پایدار بوده، باید پایدار گردد. همان‌گونه که از نتایج [۱۸] بر می‌آید، سیستم آونگ برگشتی در حضور تاخیر پایدار گردیده است، اما در شبیه سازی مقاله پیش رو سیستم آونگ برگشتی تحت پدیده از دست رفتن بسته های اطلاعاتی پایدار می‌گردد. طبق تئوری ۱ و شرایط حاکم بر آن، فرآیند از دست رفتن بسته های اطلاعاتی به دو تاخیر d_k^{sc} و d_k^{ca} تبدیل می‌شود. این دو تاخیر بدین ترتیب به خود مقدار می‌گیرند.

$$d_k^{ca} = i = \{۰, ۱, ۲\}, d_k^{sc} = m = \{۰, ۱, ۲\}$$

و ماتریس های انتقال مقادیر زیر را به خود می‌گیرند.

$$A = \begin{bmatrix} ۰.۶ & ۰.۴ & ۰ & ۰ \\ ۰.۵ & ۰.۴ & ۰.۱ & ۰ \\ ۰.۵ & ۰.۴ & ۰.۱ & ۰ \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} ۰.۴ & ۰.۶ \\ ۰.۵ & ۰.۵ \end{bmatrix}$$

ماتریس های فوق بیانگر چگونگی تغییر فرآیند از دست

$$\begin{bmatrix} -X_{i,m} & 0 & X_{i,m} A_m^T \Theta & X_{i,m} \\ * & -Q & \Psi_{i,m} \Theta & 0 \\ * & * & -\Omega & 0 \\ * & * & * & -\frac{1}{\mu} Q \end{bmatrix} < 0 \quad (۹)$$

در بالا * نمایانگر تقارن بوده، به منظور سهولت در

بیان، برای $d_k^{sc} = i \in S_1, d_k^{ca} = m \in S_2$ تساوی های زیر تعریف می‌شود:

$$A(d_k^{sc}) \triangleq A_m, B(d_k^{sc}, d_k^{ca}) \triangleq B_{i,m},$$

$$\underline{\rho} = \min\{\rho_{ii}, i \in S_1\}, \underline{d}_1 = \min\{d_k^{sc}, K \in Z\},$$

$$\mu = 1 + (1 - \underline{\rho})(d_1 - \underline{d}_1), K = (I + \Gamma^T \Gamma)^{-1} [\Gamma^T \quad I].$$

در LMI فوق:

$$\Theta = [\sqrt{\lambda_{m1} \rho_{i1}} I, \dots, \sqrt{\lambda_{mn} \rho_{ij}} I, \dots, \sqrt{\lambda_{md_2} \rho_{id_1}} I],$$

$$Q = R^{-1}, \Omega = \text{diag}[X_{1,1}, \dots, X_{j,n}, \dots, X_{d_1, d_2}].$$

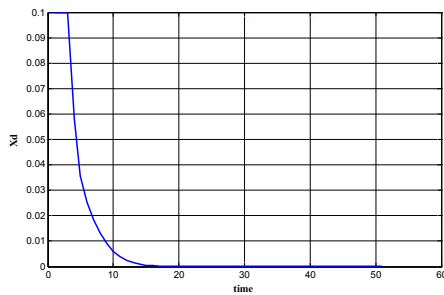
$$\Psi_{i,m} = R^{-1} B_{i,m}^T,$$

قانون کنترلی نیز از روش زیر به دست می‌آید:

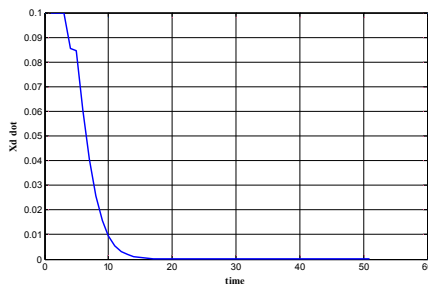
$$u(k) = \begin{cases} u(k-1) & d_k^{ca} > 0 \\ [K \Psi_{i,0}^T Q^{-1} [I \quad 0]^T x(k-d_k^{sc}) & d_k^{ca} = 0 \end{cases} \quad (۱۰)$$

۳- شبیه سازی سیستم آونگ برگشتی

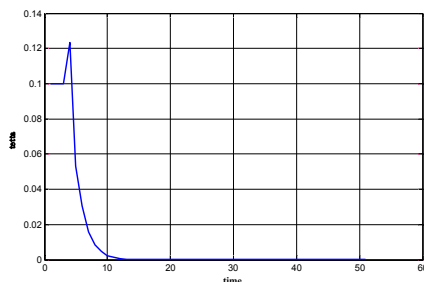
در این بخش با توجه به بخش قبلی سعی در شبیه سازی و نشان دادن صحت روش های ارائه شده داریم. در ادامه یک سیستم آونگ برگشتی که از طریق شبکه کنترل می‌شود و پدیده از دست رفتن بسته های اطلاعاتی در دو مسیر سنسور/کنترل کننده و کنترل کننده/عملگر رخ می‌دهد را از طریق روش ارائه شده در بخش قبل (در مورد سیستم های خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف با ماتریس معین انتقال) پایدار می‌سازیم. نتایج حاصل از شبیه سازی پایداری سیستم را تضمین می‌کند. همان‌گونه که در شکل (۵) دیده می‌شود، موقعیت ارابه x_d و موقعیت زاویه ای آونگ برگشتی θ است. متغیرهای حالت سیستم به صورت $[x_d \quad \dot{x}_d \quad \theta \quad \dot{\theta}]^T$ و خروجی های سیستم به صورت $[x_d \quad \theta]^T$ در نظر گرفته شده اند. سطح در نظر



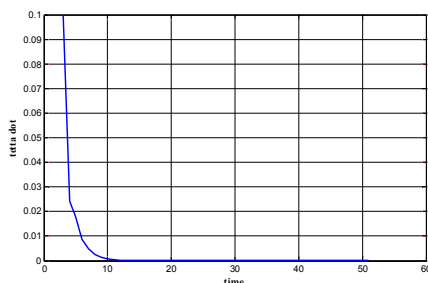
شکل (۶ الف): حالت اول (مکان گاری) در سیستم آونگ برگشتی



شکل (۶ ب): مشتق حالت اول (مکان گاری) در سیستم آونگ برگشتی



شکل (۶ ج): حالت دوم (زاویه آونگ) در سیستم آونگ برگشتی



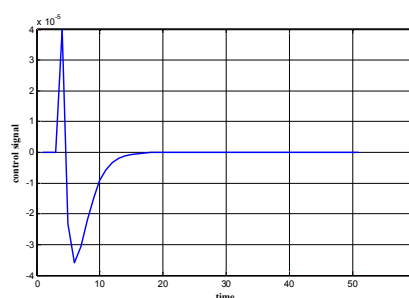
شکل (۶ د): مشتق حالت دوم (زاویه آونگ) در سیستم آونگ برگشتی

رفتن بسته‌های اطلاعاتی هستند.

۳-۱- نتایج شبیه سازی

ابتدا ماتریس (۹) را در نرم افزار متلب و تحت جعبه ابزار YALMIP تعریف کرده تا تحت نامسازای خطی ماتریسی حل شود. یکی از مشکلات موجود در این مرحله وابستگی کنترل کننده تعریف شده در تئوری ۱، به ماتریس $\Psi_{i,0}$ است. از آنجا که $\Psi_{i,0}$ به ماتریس $B_{i,0}$ وابسته بوده، در تعریف $B_{i,m}$ وابستگی به F_i دیده می‌شود، در حقیقت نوعی دور به وجود آمده است که solver های جعبه ابزار YALMIP قادر به حل آن نیستند. به همین دلیل باید در طراحی کنترل کننده از روش بازگشتی استفاده نمود تا این مشکل رفع شود و مقادیر کنترل کننده به دست آید. استفاده از روش بازگشتی با مشکلاتی همراه است که در ادامه بدان پرداخته خواهد شد. یکی از مشکلات استفاده از روش بازگشتی، انتخاب مقدار اولیه برای متغیر مورد نظر است؛ چراکه این مقدار اولیه در همگرایی کنترل کننده تاثیر بسزایی خواهد داشت. به همین دلیل، در ادامه نتایج شبیه سازی به ازای مقدار اولیه مناسب برای کنترل کننده نمایش داده خواهد شد تا تاییدی بر روش ارائه شده باشد. در ادامه خروجی و حالات سیستم در حضور کنترل کننده نمایش داده خواهد شد. ابتدا ماتریس کنترل کننده F_i به ازای مقدار اولیه $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ به صفر همگرا شده که قابل قبول نبوده و به بیانی دیگر کنترل کننده‌ای در سیستم وجود ندارد و به همین دلیل مقدار اولیه ماتریس کنترل کننده را برابر $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ در نظر گرفته‌ایم. خروجی و حالات سیستم در حضور کنترل کننده به نمایش در آمده است. همگرا شدن حالات و مشتقات آن به سمت مبدأ حاکی از پایدار شدنی بودن سیستم و پایدار بودن سیستم است. به عبارت دیگر، نتایج حاصل از شبیه سازی نه تنها نشان می‌دهد که سیستم کد نظر پایدار شدنی است، بلکه نشان می‌دهد با استفاده از روش معرفی شده سیستم آونگ برگشتی در حضور پدیده از دست رفتن بسته‌های اطلاعاتی پایدار شده است.

- Networks, IEEE Control Systems Magazine, Volume: 24, page(s): 58 - 71, June 2004.
- [7] Jing Wu "MODELING, ANALYSIS AND DESIGN OF NETWORKED CONTROL SYSTEMS" Department of Electrical and Computer Engineering, University of Alberta, A thesis, degree of Doctor of Philosophy, 2008.
- [8] Joaõ P. Hespanha, Payam Naghshtabrizi and Yonggang Xu" A Survey of Recent Results in Networked Control Systems", Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 1, 2007.
- [9] Tor Vergata, Via del Politecnico Autonomic control and personalization of a wireless access network/ Dipartimento di Ingegneria Electronica, University of Rome, Italy/D.I.E.I., University of Perugia, Italy/January 2007
- [10] Yodyium Tipsuwan, Mo-Yuen Chow "Control methodologies in networked control systems" Advanced Diagnosis and Control Lab, Department of Electrical and Computer Engineering, North Carolina State University, Daniels Hall, Control Engineering Practice 11 1099-1111, 2003.
- [11] W.Zhang, M.S. Branicky, and S.M. Philips, 'Stability of networked control systems,' IET Control Theory Syst. Mag, Vol. 21, no 5, pp.1336-1343, 2007.
- [12] M.G.Rivera, A.Barreiro, 'Analysis of Networked control systems with drops and variable delays,' Automatica, Vol 43, pp.2054-2059, 2007.
- [13] M.Yu, L.Wang et al, 'stabilization of networked control systems with data packet dropout and network delays via switching system approach,' in Proceedings of the 43rd IEEE Conference on Decision and Control, pp.3539-3544, 2004.
- [14] S.C. Smith, P.seiler, 'Estimation with lossy measurements: jump estimators for jump systems,' IEEE trans. Automa.Control, vol.48, no. 12, pp.2163-2171, 2003.
- [15] J. Wu, T. Chen, and L. Wang, 'Delay-dependent robust stability and H^∞ control for jump linear systems with delays'. Systems and Control Letters, vol. 55, pp. 939-948, 2006.
- [16] J. Wu, T. Chen, and S. Xu, ' Stochastic stabilization and H^∞ control for discrete jumping systems with time delays. Asian Journal of Control, vol. 7, pp. 223-230, 2005
- [17] J. Wu and T. Chen, 'Design of networked control systems with packet dropouts'. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 52, No. 7, pp. 1314-1319, 2007.
- [18] Y.Shi, B.Yu, 'Output Feedback Stabilization of Networked Control Systems



شکل (۶): سیگنال کنترلی در سیستم آونگ برگشتی

۴- نتیجه گیری

در این مقاله سیستم آونگ برگشتی کنترل شده تحت شبکه با یک سیستم خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف به همراه تاخیر مدل شده است. تبدیل پدیده از دست رفتن بسته های اطلاعاتی به پدیده تاخیر امکان استفاده از نتایج حاکم بر سیستم های خطی پرشی مدل شده با حلقه مارکف به همراه تاخیر را فراهم می آورد و به کمک آن سیستم آونگ برگشتی در حضور پدیده از دست رفتن بسته های اطلاعاتی و از طریق مدل سازی این پدیده با پدیده تاخیر، پایدار شده است.

مراجع

- [1] James R. Moyne, and Dawn M. Tilbury: The Emergence of Industrial Control Networks for Manufacturing Control, Diagnostics, and Safety Data. Vol. 95, No. 1, Proceedings of the IEEE, 2007.
- [2] Y. Tipsuwan and M. Y. Chow, Gain adaptation of networked mobile robot to compensate QoS deterioration. In the 28th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 02), volume 4, pages 3146-3151, 2002.
- [3] T. J. Tarn and N. Xi, Planning and control of Internet-based Tele-operation. In Proceedings of SPIE: Tele-manipulator and Tele-presence Technologies, pages 189-193, 1998.
- [4] Wen-An Zhang, Li Yu" Modelling and control of networked control systems with both network-induced delay and packet-dropout", Department of Automation, Zhejiang University of Technology, Article registered in science direct, 2008.
- [5] T.C. Yang" Networked Control Systems: A Brief Survey" IEEE Proc.-Control Theory Apple, Vol 153, No 4, 2006.
- [6] Closed Loop Control over Wireless

with Random Delays Modeled by Markov Chains'. IEEE Trans on Automatic Control, vol.54, no. 7, 2009.