

تخمین تاخیر شبکه در سیستمهای کنترلی و کاهش اثرات شبکه با استفاده از روش مدیریت ارسال اطلاعات

امیرعلی مهاجرپور^۱، علی کریمپور^۲، ناصر پریز^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی برق، کنترل دانشگاه فردوسی مشهد: A.A.Mohajerpour@gmail.com

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد

۳- عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در این مقاله ابتدا اثرات شبکه بطور همزمان در معادلات سیستم کنترل مدل می شوند، عملکرد سیستم کنترل در هنگام استفاده از شبکه مورد بررسی قرار گرفته و یک کران بالا برای اثرات شبکه بطوریکه سیستم کنترلی عملکرد مطلوبی داشته باشد، بیان می گردد. در ادامه با در نظر گرفتن تاخیر شبکه بصورت یک متغیر تصادفی و ارائه یک مدل مناسب در معادلات سیستم کنترل شبکه برای آن، یک تخمین بصورت لحظه ای از این اثر با استفاده از طراحی فیلتر کالمن توسعه یافته، بدست آورده می شود. در انتها در راستای کاهش اثرات شبکه، الگوریتمی مناسب جهت ارسال اطلاعات، ارائه می گردد.

کلمات کلیدی

سیستمهای کنترل شبکه، فیلتر کالمن توسعه یافته، مدیریت ارسال، ضریب اولویت

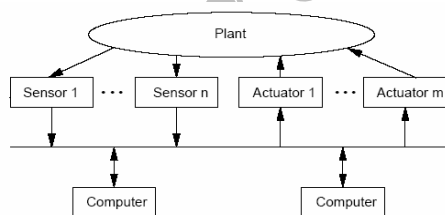
که به منظورهایی مختلف مورد استفاده قرار گرفته شده اند بوسیله شبکه به یک سیستم کنترلی متصل شده اند.

۱- مقدمه

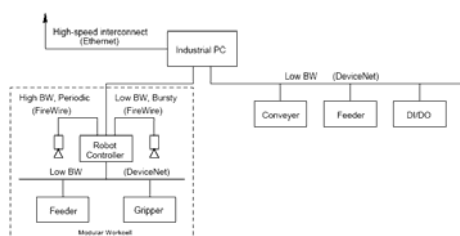
امروزه در بسیاری از سیستمهای کنترلی از جمله هواپیماها، رباتها و کارخانجات، جهت مبادله سیگنالهای کنترلی بین اجزاء سیستمها، از شبکه استفاده می شود. توسعه میکرو کنترلرها باعث افزایش کارایی استفاده از کامپیوترها در سیستمهای کنترلی گردیده است، بطوریکه استفاده از چیپهای ASIC پیاده سازی سنسورها و عملگرها را بصورت گرههای^۱ شبکه ممکن ساخته و این امر موجب پدید آمدن سیستمهای کنترل شبکه (NCS)^۲ گردیده است. شکل (۱) یک سیستم کنترل شبکه را نشان می دهد [۲].

بطور کلی به سیستمهای کنترل فیدبکی که در حلقه های کنترل آنها از یک سیستم شبکه استفاده شده باشد، سیستم کنترل شبکه (NCS) اطلاق می گردد. آنالیز این سیستمها به علت وجود شبکه در حلقه فیدبکی پیچیده می باشد [۳].

سیستم کنترل شبکه دارای کاربردهای مختلفی می باشد [۱]. شکل (۲) یک نمونه از این کاربردها را نشان می دهد، در آن وسایلی



شکل (۱) سیستم کنترل شبکه



شکل (۲) نمونه از کاربرد سیستم کنترل شبکه

که δ_L تأخیر ثابت لینک (L) ام، P سایز بسته برحسب بایت، β_L سایز بافر لینک (L) ام برحسب تعداد بسته‌ها و η_L سرعت لینک برحسب بیت در ثانیه است (برای سادگی فرض شده تمام بسته‌ها هم‌سایز می‌باشند).

دو ترم آخر معادله ذکر شده به زمانی که یک بسته ممکن است در صف تلف کند و به زمانی که یک بسته در حین انتقال می‌گذارد، بستگی دارند. برای مشخص کردن ماکزیمم تأخیر بین دو گره در یک شبکه، معادله قبل با \sum تشکیل می‌شود:

$$\tau_{\max} = \sum_L \left(\delta_L + \frac{8P(\beta_L + 1)}{\eta_L} \right) \quad (2)$$

که در آن L شامل تمام لینک‌هایی است که بسته، در سیستم کنترل شبکه، بین منبع و مقصد از طریق آنها انتقال خواهد یافت. همچنین می‌توان مینیمم تأخیر تئوری را برای یک مسیر شبکه بصورت زیر محاسبه نمود:

$$\tau_{\min} = \sum_L \delta_L + \frac{8P}{\eta_L} \quad (3)$$

تأخیر تمامی بسته‌ها در انتقال بسته بین $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ محدود خواهند بود. با توجه به معادلات فوق سایزهای کوچکتر بافر منجر به تأخیرهای ماکزیمم کوچکتر می‌شوند [۷].

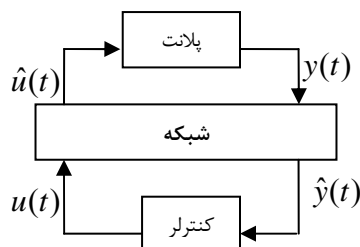
۲-۲- سرعت‌های متفاوت لینکها

مشکل دیگر انتقال ترافیک در هنگام استفاده از لینک‌هایی با سرعت‌های متفاوت می‌باشد. در هر مرز بین یک لینک سریعتر و یک لینک کندتر، اطلاعات در لینک کندتر، وقتی که لینک سریعتر کار ارسال را با سرعت بیشتری انجام می‌دهد، ممکن است از بین بروند [۷].

۳- مدل نمودن سیستم کنترل شبکه

۳-۱- سیستم کنترل شبکه خطی

بطور کلی یک سیستم کنترل شبکه شامل سه قسمت اصلی می‌باشد. با توجه به شکل (۳)، در جهت مدل نمودن سیستم کنترل شبکه، قسمت‌های مختلف آن به فرم زیر بیان می‌گردند.



شکل (۳)-قسمتهای تشکیل دهنده سیستم کنترل شبکه

تمامی مزایای استفاده از شبکه، شامل کاهش هزینه، کاهش سیم کشی و هزینه نگهداری کم، را می‌توان به سیستم‌های کنترل شبکه نسبت داد. اما پیاده‌سازی سیستم‌های کنترل شبکه با مشکلاتی همراه بوده، که دو نمونه از مهمترین آنها تأخیر^۳ و اتلاف اطلاعات^۴ می‌باشد [۴].

این مقاله به بررسی کامل دو پدیده تأخیر و اتلاف اطلاعات پرداخته و با مدل نمودن هر کدام، یک کران برای هر یک بدست می‌دهد.

همچنین اکثراً در زمینه تحلیل سیستم‌های کنترل شبکه، تأخیر و اتلاف اطلاعات با یک مقدار معین در نظر گرفته شده اند، که با توجه به ساختار شبکه‌های گسترده، این بیان صحیح نمی‌باشد و این امر بیان کننده لزوم در نظر گرفتن آنها بصورت نامعین و تخمین مناسب آنها با اطلاعات موجود در هر لحظه می‌باشد. در این مقاله تأخیر شبکه بصورت یک متغیر تصادفی در نظر گرفته شده و توسط طراحی فیلتر کالمن مناسب تخمین زده می‌شود.

در پایان الگوریتمی خاص برای عملکرد مناسب سیستم در تأخیر و اتلاف اطلاعات بالا در شبکه، ارائه می‌گردد.

۲- اثرات شبکه بر عملکرد سیستم‌های کنترلی

مشکلات اولیه در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل شبکه، اتلاف اطلاعات و تأخیرهای انتقال می‌باشند. بعضی تأخیرها در انتقال اطلاعات ذاتی هستند و تغییر نمی‌کنند و قسمتی از تأخیرهای شبکه می‌توانند متفاوت باشند. برخی از دلایل اولیه اتلاف اطلاعات و تأخیر در این قسمت بررسی می‌شوند.

۱-۲- روترها، سوئیچ‌ها و هاب‌ها

روتر یک وسیله شبکه با یک اینترفیس بین دو یا چند شبکه است که ترافیک را بین هر شبکه مسیریابی می‌کند. سوئیچ‌ها و هاب‌ها وسایل شبکه می‌باشند که بسته‌ها را بین سگمنتهای^۵ شبکه فیلتر کرده و ارسال می‌نمایند. هر یک از این تجهیزات دارای مقدار معینی حافظه برای هر لینک، جهت ذخیره بسته‌هایی که باید در زمان مناسب روی لینک فرستاده شوند، می‌باشند. این عمل ذخیره- و- ارسال^۶ نامیده می‌شود. اطلاعات زمانیکه گره به هاب، سوئیچ و یا روتر متصل شود، با سرعت بیشتری نسبت به وسیله‌ای که ترافیک را انتقال می‌دهد، انتقال می‌یابند. بافر حافظه در این حالت پر شده و اطلاعات تأخیر یافته می‌شوند و یا از دست می‌روند. ماکزیمم تأخیر در یک لینک به طور مستقیم به سایز بافر لینک بستگی دارد.

$$\tau_{L,\max} = \delta_L + \frac{8P\beta_L}{\eta_L} + \frac{8P}{\eta_L} = \delta_L + \frac{8P(\beta_L + 1)}{\eta_L} \quad (1)$$

$$\Lambda_{12} = \begin{bmatrix} B_p.\theta & B_p.\theta.D_c.\varphi \\ 0 & -B_c.\varphi \end{bmatrix}$$

$$\Lambda_{21} = \begin{bmatrix} C_c.B_c.\varphi.C_p & C_c.A_c \\ C_p.A_p + B_p.\theta.D_c.\varphi.C_p & B_p.\theta.C_c \end{bmatrix}$$

$$\Lambda_{22} = \begin{bmatrix} 0 & -C_c.B_c.\varphi \\ -B_p.\theta & -B_p.\theta.D_c.\varphi \end{bmatrix}$$

می باشند.

وجود ماتریسهای معرف کنترلر (D_c, C_c, B_c, A_c) در عناصر $\Lambda_{22}, \Lambda_{21}, \Lambda_{12}$ بیان کننده اثر ساختار کنترلر بر روی عملکرد سیستم کنترل شبکه می باشد.

همچنین اگر در شبکه تاخیر وجود نداشته باشد یعنی:

$$\hat{y}(t) = y(t) \quad , \quad \hat{u}(t) = u(t) \quad (13)$$

آنگاه $e_1 = e_2 = 0$ بوده و سیستم کنترل شبکه به صورت بیان

میشود:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \Lambda_{11} \begin{bmatrix} x_p \\ x_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

وجود ماتریسهای (D_c, C_c, B_c, A_c) در عناصر Λ_{11} بیان کننده اثر ساختار کنترلر بر روی عملکرد سیستم کنترل در زمان وجود اتلاف اطلاعات در شبکه می باشد.

نتایج فوق لزوم توجه به انتخاب کنترلی که برخورد مناسبی با تاثیرات شبکه بر روی عملکرد سیستم داشته باشد، را نمایان می سازد.

مثال ۱: سیستم زیر در گرفته می شود:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + By(t) \\ u(t) &= Cx(t) \\ A &= \begin{bmatrix} -1.0285 & 0.9853 & -0.9413 & 0 \\ -1.2903 & -1.0957 & 2.8689 & 1.5000 \\ 0.1871 & -3.8184 & -2.0788 & -0.2000 \\ 0.4069 & -4.1636 & 2.5407 & 3.2300 \end{bmatrix}; \\ B &= [0 \quad 6.63 \quad 0 \quad 0]; \\ C &= [-1.7786 \quad 1.1390 \quad 0 \quad -1.0294]; \end{aligned} \quad (15)$$

برای این سیستم کنترلرهای LQG ، LTR / LGQ (H_2) و کنترلر روبااست (H_∞) را بدون در نظر گرفتن اثر شبکه طراحی می گردند. شکل (۴) پاسخ سیستم کنترل شبکه را با فرض $\theta = I$ و تاخیرهای متفاوت با کنترلر های بیان شده نشان میدهد.

پلانت: به صورت زیر در نظر گرفته می شود :

$$\begin{aligned} \dot{x}_p(t) &= A_p x_p + B_p \hat{u}(t) \\ y(t) &= C_p x_p(t) \end{aligned} \quad (4)$$

که x_p حالتها، \hat{u} ورودی و y خروجی پلانت می باشند.

کنترلر: با معادلات زیر در نظر گرفته می شود:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c(t) &= A_c x_c(t) + B_c \hat{y}(t) \\ u(t) &= C_c x_c(t) + D_c \hat{y}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

که x_c حالتها، \hat{y} ورودی و u خروجی کنترلر می باشند.

شبکه: توسط تعریف خطا بین سیگنالهای ورودی به شبکه و خروجی از آن مدل می گردد. e_1 و e_2 بعنوان خطای تاخیر شبکه ($\tau = \text{تاخیر}$) در نظر گرفته شده و بصورت زیر تعریف می شوند:

$$\begin{aligned} e_1 &= u - \hat{u} \quad , \quad \hat{u}(t) = u(t - \tau) \\ e_2 &= y - \hat{y} \quad , \quad \hat{y}(t) = y(t - \tau) \end{aligned} \quad (6)$$

برای مدل نمودن اثر اتلاف اطلاعات، ماتریسهای اتلاف سیگنال کنترلی و اتلاف خروجی پلانت تعریف میگردند.

ماتریس اتلاف سیگنال کنترلی عبارتست از:

$$\theta = \text{diag} \{ \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m \} \quad (7)$$

θ_i احتمال عبور سیگنال کنترلی \hat{u}_i می باشد، به این ترتیب که برای عبور سیگنال، $\theta_i = 1$ و برای اتلاف $\theta_i = 0$ در نظر گرفته می شود، با این تعریف سیگنال کنترلی ورودی به پلانت عبارتست از

$$\hat{u} = \theta \cdot \hat{u} \quad (8)$$

ماتریس اتلاف خروجی پلانت عبارتست از

$$\varphi = \text{diag} \{ \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_w \} \quad (9)$$

که φ_i احتمال عبور خروجی \hat{y}_i می باشد به این ترتیب که برای عبور، $\varphi_i = 1$ و برای اتلاف $\varphi_i = 0$ در نظر گرفته می شود، با این تعریف سیگنال ورودی به کنترلر عبارتست از

$$\hat{y} = \varphi \cdot \hat{y} \quad (10)$$

حال اگر متغیرهای حالت سیستم کنترل شبکه به صورت

$$z = [x_p, x_c, e_1, e_2]^T$$

سیستم به صورت زیر بیان می گردد:

$$\dot{z}(t) = \Lambda z(t) \quad \& \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \Lambda_{12} \\ \Lambda_{21} & \Lambda_{22} \end{bmatrix} \quad (11)$$

که در آن

$$\Lambda_{11} = \begin{bmatrix} A_p + B_p.\theta.D_c.\varphi.C_p & B_p.\theta.C_c \\ B_c.\varphi.C_p & A_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

راحتی می توان با استفاده از روابط فوق قضایای بیان شده در زمینه تاخیر مجاز در سیستمهای کنترل شبکه [۱، ۴، ۵، ۶] را به حالت کلی (وجود تاخیر و اتلاف اطلاعات در سیستم) مربوط ساخت. با اینکه $\lambda_1 = \lambda_{\min}(P)$ و $\lambda_2 = \lambda_{\max}(P)$ باشند نشان دهنده مقادیر ویژه میباشد، قضیه زیر نمونه ای از این قضایا می باشد که یک کران بالا برای تاخیر مجاز در شبکه را با در نظر گرفتن اتلاف اطلاعات بیان میکند.

قضیه ۱- برای یک سیستم کنترل شبکه که دینامیک آن به فرم $\dot{z}(t) = \Lambda z(t)$ و با N گره باشد در صورتیکه ماکزیمم تاخیر

$$\tau_m \leq \min \left\{ \frac{\ln(2)}{N \|\Lambda\|}, \frac{1}{4 \|\Lambda\| \left(\sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + 1 \right) N(N+1)} \right\} \quad (17)$$

$$\frac{1}{8 \|\Lambda\|^2 \lambda_2 \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \left(\sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + 1 \right) N(N+1)}$$

آنگاه سیستم کنترل شبکه دارای پایداری نمائی همه جایی است [۸].

۲-۳- سیستم قدرت غیر خطی

فرض می شود کنترلر غیر خطی بدون در نظر گرفتن شبکه، طراحی گردد و سیستم قدرت پایدار باشد. سیستم قدرت غیر خطی بدون در نظر گرفتن شبکه، به صورت زیر تعریف می گردد:

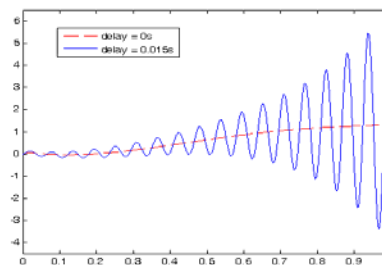
$$\dot{x}(t) = f_1(t, x(t), u(t)) \quad (18)$$

فرض می شود سیستم کنترل شبکه به فرم شکل (۳) باشد، آنگاه تاثیر شبکه به صورت خطاهای $e_1 = \hat{y} - y$ و $e_2 = \hat{u} - u$ می توان شبکه سیستم قدرت را به فرم زیر در نظر گرفت:

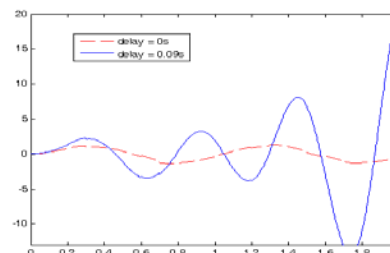
$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(t, x(t), e(t)) \\ \dot{e}(t) &= g(t, x(t), e(t)) \end{aligned} \quad (19)$$

اگر $e(t) = 0$ گردد، آنگاه سیستم به فرم بدون شبکه تبدیل شده، پایدار بوده و اگر $V(t, x)$ تابع لیاپانوف سیستم بدون شبکه باشد برای $\infty > c_5 \geq \|x\|$ بدست می آید:

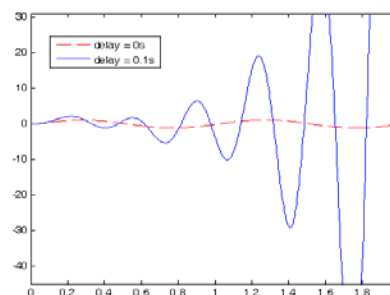
- 1) $c_1 \|x\|^2 \leq V(t, x) \leq c_2 \|x\|^2$
- 2) $\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f(t, x, 0) \leq -c_3 \|x\|^2$
- 3) $\left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \leq c_4 \|x\|$



شکل (۴-الف) پاسخ سیستم با کنترلر LQG با $t_0 = 0, 0.01$



شکل (۴-ب) پاسخ سیستم با کنترلر H_2 با $t_0 = 0, 0.09$



شکل (۴-ج) پاسخ سیستم با کنترلر H_∞ با $t_0 = 0, 0.1$

شکل (۴) - پاسخ سیستم کنترل شبکه

همانطور که مشاهده می شود کنترلرهای مختلف باعث عملکردهای متفاوتی در سیستمها می گردند. (میتوان نشان داد در این مثال بیشترین تاخیر مجاز برای کنترلر LQG برابر 0.004 ، برای کنترلر H_2 برابر 0.056 و برای کنترلر H_∞ برابر 0.088 ثانیه می باشد [۸]). لذا لزوم استفاده از کنترلی که برخورد مناسبی با اثرات ناشی از شبکه داشته باشد، کاملاً مشهود می گردد.

حال اگر اثر شبکه در نظر گرفته نشود ($e_1 = e_2 = 0$)

گردیده که $\dot{x}(t) = \tilde{\Lambda}x(t)$ آنگاه ($\theta = I_q$ و $\varphi = I_w$)

$$\tilde{\Lambda} = \begin{bmatrix} A_p + B_p D_C C_p & B_p C_C \\ B_C C_p & A_C \end{bmatrix} \quad (16)$$

بنابراین $\tilde{\Lambda}$ هرویتز بوده (فرض پایداری سیستم اصلی) و در نتیجه ماتریس یکتای مثبت معین P را می توان به صورت $\tilde{\Lambda}^T P + P \tilde{\Lambda} = -I$ در نظر گرفت. با اندکی تغییر در تعاریف به

- ارائه الگوریتم مناسب جهت مدیریت ارسال اطلاعات با توجه به مقادیر تخمین زده شده لحظه ای و مقادیر مجاز برای هر یک بیان شروط لازم برای عملکرد مناسب سیستم کنترل شبکه طراحی کنترلر بصورت لحظه ای با استفاده از اطلاعات بدست آمده از تخمین، یکی از روشهای مناسب برای تخمین تاخیر استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته می باشد. یکی از کاربردهای فیلتر کالمن توسعه یافته تخمین پارامتر می باشد. برای سیستمهای کنترل شبکه می توان با تعریف تاخیر بصورت متغیر حالت و تبدیل سیستم خطی به یک سیستم غیرخطی، با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته، تاخیر را همزمان با حالات سیستم تخمین زد.

با فرض آنکه تابع تبدیل سیستم اصلی $G(s)$ باشد، اگر سیستم دارای تاخیر τ باشد، آن را بصورت $\exp(-\tau s)$ در نظر گرفته، تابع تبدیل سیستم با تاخیر به صورت $\exp(-\tau s) \times G(s)$ بیان می گردد. حال در معالات حالت این سیستم جدید، تاخیر را بصورت متغیر حالت تعریف نموده، با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته تخمین زده می شود. معادلات سیستم به صورت زیر می باشد:

$$\begin{cases} X(k+1) = f(\tau, X(k)) + w(k) + u(k) \\ y(k+1) = X(k+1) + v(k+1) \\ w(k) \sim N(0, q) \\ v(k) \sim N(0, r) \\ x(0) \sim N(0, P_0) \end{cases} \quad (22)$$

τ تاخیر مجهول می باشد که همراه متغیرهای حالت X ، باید تخمین زده شود. به منظور استفاده از فیلتر کالمن برای تخمین پارامترها، باید تاخیر را به صورت متغیر حالت به معادلات سیستم اضافه نمود. لذا معادلات سیستم جدید به صورت زیر بدست می آید:

$$\begin{cases} X(k+1) = f(\tau(k), x(k)) + w(k) + u(k) \\ \tau(k+1) = \tau(k) + w_\tau(k) \\ y(k+1) = X(k+1) + v(k+1) \\ w_\tau(k) \sim N(0, q_\tau) \end{cases} \quad (23)$$

$w(k)$ ، $w_\tau(k)$ و $v(k)$ مستقل از هم بوده و $u(k)$ سیگنال ورودی معینی می باشد. با تعریف

$$\begin{aligned} X(k) &= \begin{bmatrix} X(k) \\ \tau(k) \end{bmatrix}, \quad f(X(k)) = \begin{bmatrix} f(\tau(k), X(k)) \\ \tau(k) \end{bmatrix}, \\ W(k) &= \begin{bmatrix} w(k) \\ w_\tau(k) \end{bmatrix} \sim N(0, Q), \\ Q &= \begin{bmatrix} q & 0 \\ 0 & q_\tau \end{bmatrix}, \quad U(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

حال $z(t) = [x(t), e(t)]^T$ در نظر گرفته در نتیجه:

$$\dot{z}(t) = h(t, z(t)) \quad (20)$$

$e(t)$ با توجه به ساختار شبکه و استراتژی انتقال تعریف

می گردد.

قضیه ۲- برای یک سیستم کنترل شبکه قدرت غیر خطی که دینامیک آن به فرم $\dot{z}(t) = h(t, z(t))$ و با p گره می باشد در صورتیکه ماکزیمم تاخیر مجاز τ_m بصورت زیر باشد:

$$\tau < \min \left\{ \frac{\ln(2) \cdot S}{k_h P}, \frac{S}{8}, S \frac{c_3}{32k_f c_4} \left(\frac{c_1}{c_2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (21)$$

$$S = \left(\left(\sqrt{\frac{c_2}{c_1}} + 1 \right) k_h \sum_{i=1}^p j \right)^{-1}$$

k_g ، k_f و k_h به ترتیب ثابتهای لپشیتز برای g ، f و h می باشند.

آنگاه سیستم کنترل شبکه دارای پایداری نمائی در

$$D = \left\{ \|z\| < \frac{c_5}{2} \sqrt{\frac{c_1}{c_2}} \right\} \text{ می باشد [۸].}$$

۴- تخمین تاخیر در سیستمهای کنترل شبکه

تأخیر در سیستمهای کنترل شبکه می تواند معین یا تصادفی، متغیر با زمان و یا نامتغیر با زمان باشد. برای سیستمهای کنترل شبکه محلی آنالیز تأخیر و سپس طراحی کنترلر برای رسیدن به اهداف کنترلی، ممکن می باشد، اما در سیستمهای کنترل شبکه گسترده بررسی تأخیر بسیار پیچیده بوده و معمولاً تأخیر متغیر با زمان و تصادفی می باشد. بنابراین یکی از فرضیات مهم در بررسی سیستمهای کنترل شبکه در نظر گرفتن یک تأخیر زمانی نامشخص ولی کراندار می باشد. به همین ترتیب چگونگی و میزان اتلاف اطلاعات در سیستمهای کنترل شبکه گسترده را، بر خلاف سیستمهای کنترل شبکه محلی، نمی توان تعیین نمود.

اما اکثراً در زمینه تحلیل سیستمهای کنترل شبکه، تاخیر و اتلاف اطلاعات با یک مقدار مشخص در نظر گرفته شده اند، اما این بیان با توجه به ساختار شبکه های گسترده، صحیح نمی باشد، این امر بیان کننده لزوم در نظر گرفتن آنها بصورت مقادیر نامعین و تخمین مناسب آنها با اطلاعات موجود در هر لحظه می باشد. در این راستا، ابتدا باید اثر تاخیر را در معادلات سیستم کنترل شبکه، بطور مناسبی مدل نموده، سپس با استفاده از این معادلات یک تخمین بصورت لحظه ای از این اثر بدست آورد. از این تخمین بدست آمده، که می تواند حاوی اطلاعاتی مانند میانگین و واریانس باشد، می توان در موارد زیر استفاده نمود:

ملاحظه می‌شود که معادلات فوق به فرم خطی استاندارد برای فیلتر کالمن تبدیل گردیده اند. می توان $\hat{X}(k+1|k+1)$ را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\begin{cases} \hat{X}(k+1|k+1) = \hat{X}(k+1|k) + K(k+1) \\ \quad \times (y(k+1) - \hat{y}(k+1|k)) \\ K(k+1) = P(k+1|k)H(k+1) \\ \quad \times [H(k+1)P(k+1|k)H(k+1) + r]^{-1} \\ P(k+1|k) = \phi(k)P(k|k)\phi'(k) + Q \\ P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)H(k+1)] \\ \quad P(k+1|k) \\ \hat{X}(0|0) = 0 \\ P(0|0) = P_0 \end{cases} \quad (33)$$

مثال ۲: سیستم زیر در نظر گرفته شده:

$$H(s) = \frac{-8.776s + 147.4}{s^2 + 6.931s + 73.7} \quad (34)$$

با فرض آنکه سیستم دارای تاخیر $\tau = \frac{1}{T_d}$ باشد، تابع تبدیل سیستم بصورت زیر تغییر می نماید:

$$H(s) = \frac{\exp(-\frac{s}{T_d})[-8.776s + 147.4]}{s^2 + 6.931s + 73.7} \quad (35)$$

با فرض $\exp(-\frac{s}{T_d}) \approx (1 + \frac{s}{T_d})^{-1}$ تابع تبدیل به صورت زیر بدست می آید:

$$H(s) = \frac{[-8.776s + 147.4]}{(1 + \frac{s}{T_d})[s^2 + 6.931s + 73.7]} \quad (36)$$

برای این سیستم معادلات حالت به صورت زیر حاصل می شوند:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -73.7T_d & -(T_d + 73.7) & -(T_d + 6.931) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \\ y(t) = [0 \quad -8.776T_d \quad 147.4T_d] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (37)$$

حال تاخیر به صورت یک متغیر حالت کمکی بصورت زیر تعریف می گردد:

$$\dot{T}_d = w(t) = \dot{x}_4$$

لذا

$$\begin{cases} X(k+1) = f(X(k)) + W(k) + U(k) \\ y(k+1) = X(k+1) + v(k+1) \end{cases} \quad (25)$$

در الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته، روش کار به این صورت است که ابتدا معادلات غیرخطی سیستم حول نقطه کار خطی شده، سپس با استفاده از فیلتر کالمن استاندارد حالات تخمین زده می‌شوند.

با خطی سازی $f(X(k))$ حول $X^*(k)$ بدست می آید:

$$f(X(k)) \cong f(X^*(k)) + f_x(X^*(k)) \cdot (X(k) - X^*(k)) \quad (26)$$

که در آن

$$f_x(X^*(k)) = \begin{bmatrix} \tau^*(k) & x^*(k) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (27)$$

با توجه به دو رابطه فوق، معادله حالت بصورت زیر می باشد:

$$X(k+1) \cong f(X^*(k)) + f_x(X^*(k)) \cdot (X(k) - X^*(k)) + W(k) + U(k) \quad (28)$$

با اعمال عملگر $E\{*\} | Y(k)$ به طرفین رابطه بالا معادله زیر حاصل می شود: (۲۹)

$$\hat{X}(k+1|k) \cong f(X^*(k)) + f_x(X^*(k)) \cdot (\hat{X}(k|k) - X^*(k)) + U(k) \quad (29)$$

اگر $X^*(k)$ را $\hat{X}(k|k)$ تعریف کرده، بدست می آید:

$$\begin{cases} \hat{X}(k+1|k) \cong f(\hat{X}(k|k)) + U(k) \\ \hat{y}(k+1|k) \cong \hat{X}(k+1|k) \end{cases} \quad (30)$$

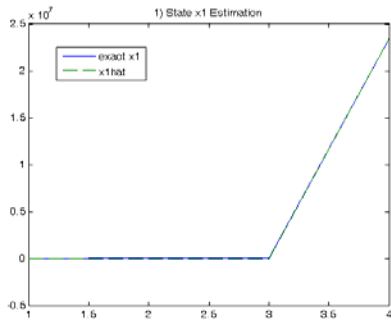
با تعاریف زیر

$$\begin{cases} \phi(k) = f_x(\hat{X}(k|k)) \\ m(k) = f(\hat{X}(k|k)) - f_x(\hat{X}(k|k))\hat{X}(k|k) + U(k) \\ H(k+1) = h_x(\hat{X}(k+1|k)) = I \\ n(k+1) = h(\hat{X}(k+1|k)) - h_x(\hat{X}(k+1|k))\hat{X}(k+1|k) \end{cases} \quad (31)$$

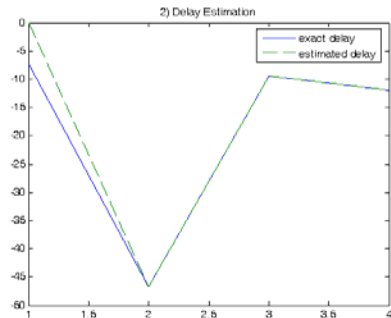
معادلات زیر بدست می آیند

$$\begin{cases} X(k+1) = \phi(k)X(k) + m(k) + W(k) \\ y(k+1) = H(k+1)X(k+1) + n(k+1) + v(k+1) \end{cases} \quad (32)$$

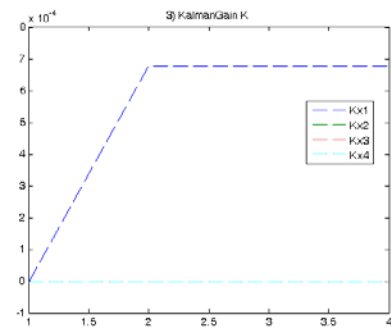
با فرض معلوم بودن $\hat{X}(k|k)$ در لحظه k نتیجه می‌شود که $\hat{X}(k+1|k)$ نیز قابل محاسبه بوده و لذا $m(k)$ و $n(k)$ سیگنال‌های معینی می‌باشند.



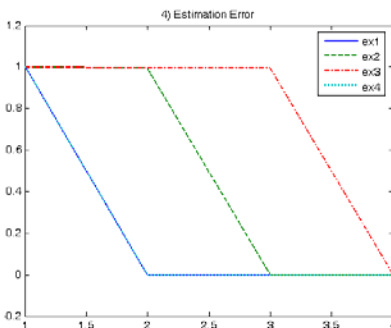
شکل (۵-الف) تخمین متغیر حالت x1



شکل (۵-ب) تخمین تاخیر



شکل (۵-ج) گین فیلتر کالمن



شکل (۵-د) خطای تخمین

شکل (۵) نتایج حاصل از فیلتر کالمن طراحی شده.

که $W(t)$ نویز سفید بوده و مشخصات آن با توجه به توپولوژی شبکه تعیین می گردد. معادلات حالت به فرم زیر تبدیل می شوند:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{T}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -73.7T_d & -(T_d + 73.7) & -(T_d + 6.931) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ T_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u + W(t) \quad (38)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & -8.776T_d & 147.4T_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ T_d \end{bmatrix} + V(t)$$

$W(t)$ و $V(t)$ نویز سفید و بیان کننده اثرات شبکه می باشند. همانطور که مشاهده می شود معادلات حالت به صورت غیر خطی می باشند. معادلات را حول نقطه حالت خطی سازی کرده، معادلات حالت خطی شده به صورت زیر حاصل می شوند:

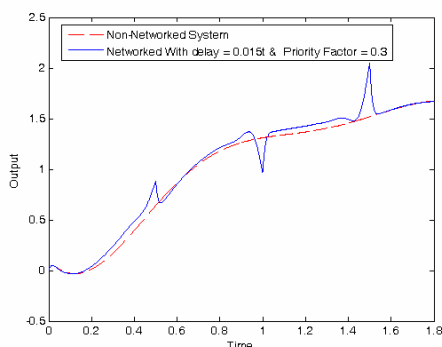
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{T}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -737 & -1073.701 & -1006.932 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ T_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u + W(t) \quad (39)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & -8.77 & 1470 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ T_d \end{bmatrix} + V(t)$$

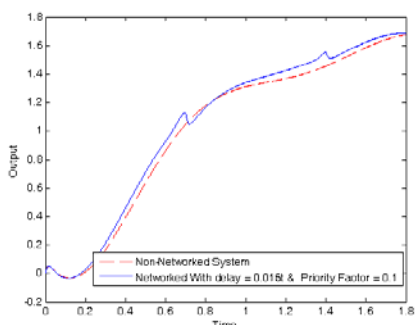
حال برای این سیستم با استفاده از فیلتر کالمن، تاخیر بصورت تخمینی از متغیر حالت T_d بدست آورده می شود. شکل (۵) نتایج حاصله را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود، به علت وجود تاخیر، سیستم ناپایدار می باشد. و همچنین فیلتر کالمن طراحی شده به خوبی تاخیر را دنبال کرده و آن را تخمین می زند.

۵- مدیریت ارسال اطلاعات

در سیستمهای کنترل شبکه قرار دادن یک کران بالا برای اثرات شبکه مستلزم صرف هزینه زیادی می گردد و حتی رسیدن به یک کران بالا برای اثرات شبکه در بسیاری از موارد ناممکن می باشد (به علت محدودیتهای موجود در زمینه تجهیزات شبکه، بعد مسافت و توپولوژی شبکه شامل تعداد گرورها و سایر موارد). یکی از روشهایی که بوسیله آن می توان تاخیر و اتلاف اطلاعات شبکه را در حد مناسبی کنترل نمود، مدیریت در ارسال سیگنالهای شبکه می باشد.

شکل (۷) - پاسخ سیستم با $\eta = 0.3$

همچنین شکل (۸) پاسخ سیستم را برای $\eta = 0.1$ نشان میدهد که علاوه بر آنکه سیستم پایدار بوده از رفتار مناسبی نیز برخوردار می باشد، در این حالت بیشترین خطای شبکه برابر 0.1 ثانیه میباشد. بنابراین می توان با یک انتخاب بهینه برای ضریب اولویت به پاسخی بهینه برای سیستم دست یافت. [۸]



شکل (۸) - پاسخ سیستم

۶- نتایج

در این مقاله ابتدا یک مدل مناسب برای سیستمهای کنترل شبکه ارائه گردید، سپس با استفاده از این مدل محدوده مجاز اثرات شبکه جهت تضمین عملکرد مناسب سیستم ارائه گردید. در ادامه با مدل نمودن تاخیر در معادلات سیستم کنترل شبکه، با استفاده از این معادلات یک تخمین بصورت لحظه ای از این اثر بدست آورده شده است. از این تخمین بدست آمده، که می تواند حاوی اطلاعاتی مانند میانگین و واریانس باشد، می توان در موارد زیر استفاده نمود:

- ارائه الگوریتم مناسب جهت مدیریت ارسال اطلاعات با توجه به مقادیر تخمین زده شده لحظه ای و مقادیر مجاز برای هر یک
- بیان شروط لازم برای عملکرد مناسب سیستم کنترل شبکه
- طراحی کنترلر بصورت لحظه ای با استفاده از اطلاعات بدست آمده از تخمین

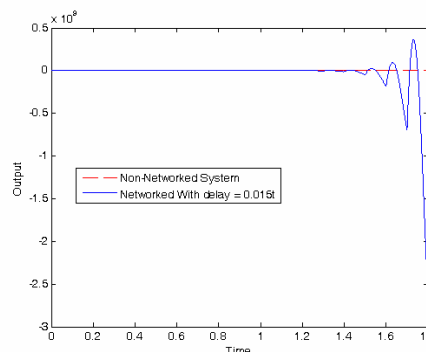
در این بخش یک روش برای چگونگی ارسال سیگنالها جهت محدود نگه داشتن اثرات یاد شده شبکه، بیان می شود.

ابتدا تعریف زیر بیان می گردد:

ضریب اولویت: اگر x_i سیگنال i ام با در نظر گرفتن شبکه و x_{di} نیز سیگنال i ام مطلوب (خروجی پلانت بدون در نظر گرفتن شبکه) باشد η را ضریب اولویت سیگنال i ام می نامیم، بطوریکه $\eta = W|x_i - x_{di}|$ باشد (W وزنی است که به خطای هر سیگنال داده می شود).

در این روش در هر ارسال، سیگنالی که دارای ضریب اولویت بالاتری باشد، فرستاده میگردد. در این روش سعی میشود با مدیریت ارسال سیگنالها، خطای هر یک، محدود نگه داشته شود. اگر دو سیگنال بطور همزمان دارای ضریب اولویت یکسانی باشند، می توان از یک اولویت بندی از پیش تعریف شده استفاده نمود. در روش فوق هدف اصلی کاهش تاخیر، با مدیریت متفاوت در ارسال اطلاعات به صورت تعریف شده، در زمانی است که به مقدار بحرانی خود نزدیک شده است.

مثال ۳: سیستم مثال (۱) را در نظر گرفته، فرض می شود که تاخیر سیستم متغیر بوده و بصورت $\tau(t) = at + \tau_0$ بیان گردد، با فرض $a = 0.015$ و $\tau_0 = 0$ عملکرد سیستم، با کنترلر روباست (H_∞) به صورت شکل (۶) می باشد. همانطور که مشاهده می شود و انتظار می رفت، سیستم به سرعت ناپایدار میشود.

شکل (۶) - پاسخ سیستم برای تاخیر $\tau(t) = 0.015t$

حال با تعریف $\eta = 0.3$ پاسخ سیستم به صورت شکل (۷) میباشد، همانطور که ملاحظه می شود سیستم پایدار بوده اما دارای پاسخ مناسبی نمی باشد، در این حالت بیشترین تاخیر در سیستم تا 0.18 ثانیه افزایش پیدا کرده است که بطور مشخص نسبت به حالتی که یک کران بالا برای تاخیر در نظر گرفته شد، افزایش پیدا نموده است، که این نتیجه در سیستمهای کنترل شبکه بسیار مهم می باشد.

در انتها نیز یک روش برای مدیریت ارسال سیگنالها، در جهت کاهش اثرات منفی شبکه بر پایداری سیستمهای کنترل شبکه بیان شد و مشاهده گردید تا حدود زیادی این اثرات کاهش پیدا نمودند.

۷- مراجع

- Gregory C. Walsh, Hong Ye, and Linda G. [۱]
Bushnell, "Stability Analysis of Networked Control Systems" (IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 10, NO. 3, MAY 2002).
- Guofeng Zhang, "Analysis and Design of Networked Control Systems", (PHD.thesis, 2003) [۲]
- Luis A. Montestruque and Panos J. Antsaklis [۳]
"On the Model-Based Control of Networked Systems", (University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, U.S.A., 2003).
- wei zhang, "Stability Analysis of Networked Control Systems", (PHD.thesis, 2001). [۴]
- "Stability of Networked Control Systems: Explicit Analysis of Delay", by (proceedings of the American control conference Chicago, 0-7803-5519-9100\$10.00, 2001, AACC). [۵]
- Babak Azimi-Sadjadi, "Stability of Networked Control Systems in the Presence of Packet Losses", by Army Research Office under ODDR& EMURI97 Program Grant No. DAAG55-97-1-0114, and under ODDR&E MURI01 Program Grant No. DAAD19-01-1-0465, and by the National Science Foundation Learning and Intelligent Systems Initiative Grant CMS9720334., 2003. [۶]
- S.Tanenbaum "Computer networks", [۷]
(book, 1997).
- امیر علی مهاجرپور، "بررسی اثرات شبکه بر عملکرد سیستمهای کنترل"، پروژه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی، ۱۳۸۵. [۸]

۸- پی نوشتها

- ۱- Nodes
۲- Networked Control System
۳- Delay
۴- Packet loss
۵- Segments