

## پایداری در سیستمهای کنترل شبکه

امیر علی مهاجرپور، علی کریمپور، ناصر پریر، محمد هادی مالک

گروه کنترل دانشگاه فردوسی مشهد

n\_pariz@ferdowsi.ac.ir

karimpor@um.ac.ir

am\_mo62@stu-mail.um.ac.ir

چکیده- در این مقاله ابتدا با بیان ساختار سیستمهای کنترل شبکه، اثرات شبکه در سیستم اصلی (سیستم بدون ارتباط شبکه) مدل میگردند، پس از آن عوامل موثر بر پایداری سیستمهای کنترل شبکه، ناشی از وجود شبکه در سیستم، مورد بررسی قرار گرفته، اثر هر یک مدل شده و یک کران بالا برای هر یک بیان می شود. با توجه به مدل در نظر گرفته شده پایداری سیستم برای موارد ذکر شده تحلیل گردیده، یک ناحیه پایداری برای سیستم بر اساس تاخیر و اتلاف اطلاعات ارائه می گردد. در ادامه نیز روشهایی جهت کاهش اثرات شبکه، با ارائه الگوریتمهای متفاوتی برای ارسال اطلاعات، بیان می شوند.

واژه های کلیدی- سیستمهای کنترل شبکه، ماتریس اتلاف، مدیریت ارسال، ضریب اطمینان

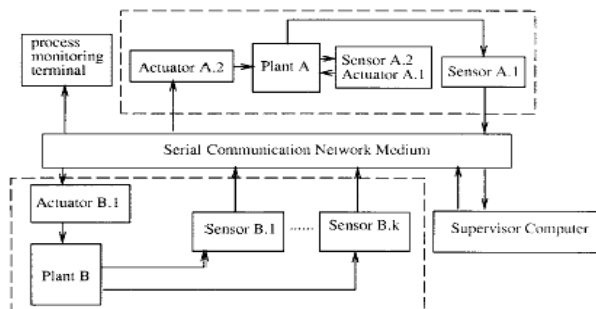
### ۱- مقدمه

شبکه نسبت داد. اما پیاده سازی سیستمهای کنترل شبکه با مشکلاتی همراه بوده، که دو نمونه از مهمترین آنها تاخیر<sup>۲</sup> و اتلاف اطلاعات<sup>۳</sup> می باشد. [۳]

روتر<sup>۴</sup> یک وسیله شبکه است که وظیفه مسیر یابی را در ترافیک شبکه بر عهده دارد. سوئیچها<sup>۵</sup> و هابها<sup>۶</sup> نیز بسته های اطلاعاتی را بین سگمنتها فیلتر کرده و ارسال می نمایند. هر یک از این وسایل دارای یک حافظه معین برای هر لینک می باشند که برای ذخیره بسته های اطلاعاتی که در زمان مناسب باید روی لینک فرستاده شوند، مورد استفاده قرار می گیرند. معمولاً سرعت انتقال اطلاعات از سرعت این بافرها و همچنین تراکم اطلاعات از حافظه بافرها بیشتر است بنابراین حافظه بافر پر شده اطلاعات تاخیر پیدا نموده و یا از بین می روند. همچنین در اتصال دو لینک با سرعتهای متفاوت زمانیکه یک لینک با

امروزه در بسیاری از سیستمهای کنترلی مانند هواپیما ها، رباتها و کارخانجات، جهت مبادله سیگنالهای کنترلی بین اجزاء سیستمها، از شبکه استفاده می شود. [۱ و ۲]

بطور کلی به سیستمهای کنترل فیدبکی که در حلقه های کنترل آنها از یک سیستم شبکه استفاده شده باشد، سیستم کنترل شبکه<sup>۱</sup> (NCS) اطلاق می گردد. شکل (۱) یک سیستم کنترل شبکه را نمایش می دهد. آنالیز این سیستمها به علت وجود شبکه در حلقه فیدبکی پیچیده می باشد. [۲ و ۴]



شکل (۱)- نمایش سیستم کنترل شبکه

تمامی مزایای استفاده از شبکه مانند کاهش هزینه، کاهش سیم کشی و هزینه نگهداری کم را می توان به سیستم کنترل

<sup>2</sup> -delay

<sup>3</sup> - Packet loss

<sup>4</sup> - router

<sup>5</sup> -switches

<sup>6</sup> - hubs

$$\theta = \text{diag} \{ \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m \}$$

که در آن  $\theta_i$  احتمال عبور سیگنال کنترلی  $\hat{u}_i$  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

$$\hat{u} = \theta \cdot \hat{u}$$

ماتریس اتلاف خروجی پلانت عبارتست از

$$\varphi = \text{diag} \{ \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_w \}$$

که  $\varphi_i$  احتمال عبور خروجی  $\hat{y}_i$  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

$$\hat{y} = \varphi \cdot \hat{y}$$

حال اگر متغیرهای حالت سیستم کنترل شبکه را به صورت  $z = [x_p, x_c, e_1, e_2]^T$  در نظر گرفته شوند، معادله فضای حالت سیستم به صورت زیر بیان می گردد:

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

که در آن

$$\Lambda_{11} = \begin{bmatrix} A_p + B_p \cdot \theta \cdot D_c \cdot \varphi \cdot C_p & B_p \cdot \theta \cdot C_c \\ B_c \cdot \varphi \cdot C_p & A_c \end{bmatrix}$$

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

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

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

می باشند.

نتایج:

- 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.
- اگر در شبکه تاخیر نداشته باشیم یعنی:

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

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

سرعت بیشتری اطلاعات را ارسال می نماید با تاخیر و اتلاف اطلاعات مواجه هستیم. [۷ و ۳]

این مقاله به بررسی کامل دو پدیده تاخیر و اتلاف اطلاعات پرداخته و با مدل نمودن هر کدام، تاثیر هر یک را بر روی سیستم بیان نموده و یک کران برای هر یک بدست می دهد، همچنین روشهایی برای عملکرد مناسب سیستم در تاخیر و اتلاف اطلاعات بالا در شبکه ارائه می گردد.

## ۲- مدل نمودن سیستم کنترل شبکه

بطور کلی یک سیستم کنترل شبکه شامل سه قسمت اصلی می باشد که با توجه به شکل (۲) در جهت مدل نمودن سیستم کنترل شبکه به فرم زیر در نظر گرفته می شوند:

۱- پلانت: به صورت زیر آنرا در نظر می گیریم:

$$\dot{x}_p(t) = A_p x_p + B_p \hat{u}(t)$$

$$y(t) = C_p x_p(t)$$

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

۲- کنترلر: با معادلات زیر آنرا در نظر می گیریم:

$$\dot{x}_c(t) = A_c x_c(t) + B_c \hat{y}(t)$$

$$u(t) = C_c x_c(t) + D_c \hat{y}(t)$$

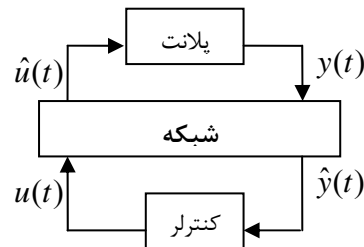
که  $x_c$  حالتها،  $\hat{y}$  ورودی و  $u$  خروجی کنترلر می باشند.

۳- شبکه: 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:

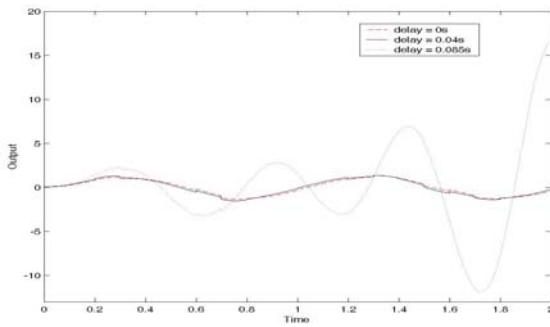
$$e_1 = u - \hat{u} \quad , \quad \hat{u}(t) = u(t - \tau)$$

$$e_2 = y - \hat{y} \quad , \quad \hat{y}(t) = y(t - \tau)$$

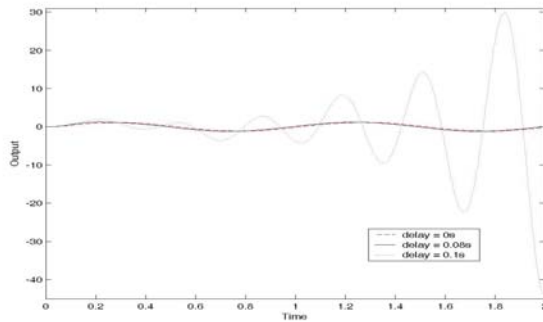


شکل (۲) - قسمتهای تشکیل دهنده سیستم کنترل شبکه

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



ب- پاسخ سیستم با کنترلر  $H_2$  با  $t_0 = 0, 0.04, 0.085$



ج - پاسخ سیستم با کنترلر  $H_\infty$  با  $t_0 = 0, 0.08, 0.1$

شکل (۳) - پاسخ سیستم کنترل شبکه

۳- اگر اثر شبکه را در نظر نگیریم ( $e_1 = e_2 = 0$ )

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

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

بنابراین  $\tilde{\Lambda}$  هر ویتز بوده و در نتیجه ماتریس یکتای مثبت معین  $P$  را می توان به صورت  $\tilde{\Lambda}^T P + P \tilde{\Lambda} = -I$  در نظر گرفت.

۴- با اندکی تغییر در تعاریف به راحتی می توان

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

**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 مجاز  $T_m$  بصورت زیر باشد:

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

که وجود ماتریسهای  $(D_c, C_c, B_c, A_c)$  در عناصر  $\Lambda_{11}$  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 ردا داشته باشد نمایان می سازد.

**مثال ۱:** سیستم زیر در گرفته می شود:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + By(t)$$

$$u(t) = Cx(t)$$

که در آن

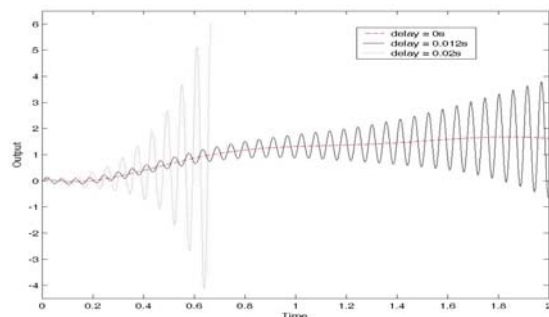
$$A = \begin{bmatrix} -1.0285 & 0.9853 & -0.9413 & 0 \\ -1.2903 & -1.0957 & 2.8689 & 1.5000 \\ 0.1871 & -3.8184 & -2.0788 & -0.2000 \\ 0.4069 & -4.1636 & 2.5407 & 3.2300 \end{bmatrix};$$

$$B = [0 \ 6.63 \ 0 \ 0];$$

$$C = [-1.7786 \ 1.1390 \ 0 \ -1.0294];$$

برای این سیستم کنترلرهای  $LQG$ ،  $LGQ/LTR$ ،  $(H_2)$  و کنترلر روبااست ( $H_\infty$ ) را بدون در نظر گرفتن اثر شبکه طراحی می گردند. شکل (۳) پاسخ سیستم کنترل شبکه را با فرض  $\theta, \varphi = I$  و تاخیرهای متفاوت با کنترلرهای بیان شده نشان میدهد.

همانطور که مشاهده می شود کنترلرهای مختلف باعث عملکردهای متفاوتی در سیستمهای می گردند. (میتوان نشان داد در این مثال بیشترین تاخیر مجاز برای کنترلر  $LQG$  برابر  $0.115$ ، برای کنترلر  $H_2$  برابر  $0.056$  و برای کنترلر  $H_\infty$  برابر  $0.088$  ثانیه می باشد. [۱۰]) لذا لزوم استفاده از کنترلی که برخورد مناسبی با اثرات ناشی از شبکه داشته باشد، کاملاً مشهود می گردد.



الف- پاسخ سیستم با کنترلر LQG با  $t_0 = 0, 0.012, 0.02$

$$\tilde{x}[k+1] = Fx[k] + Gu[k],$$

$$\tilde{y}[k] = \tilde{C}x[k],$$

$$F = \begin{bmatrix} \phi & \Gamma_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \Gamma_0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C} = [C \quad 0]$$

سیستم فوق در بر گیرنده اثر تاخیر در سیستم اصلی می باشد. که می توان از آن برای آنالیز سیستم استفاده نمود.

مراحل بررسی عملکرد سیستم کنترل شبکه را می توان به صورت زیر بیان نمود:

۱- محاسبه  $\phi$  و  $\Gamma_0, \Gamma_1$

۲- محاسبه  $F$  و  $G$

۳- بررسی عملکرد سیستم

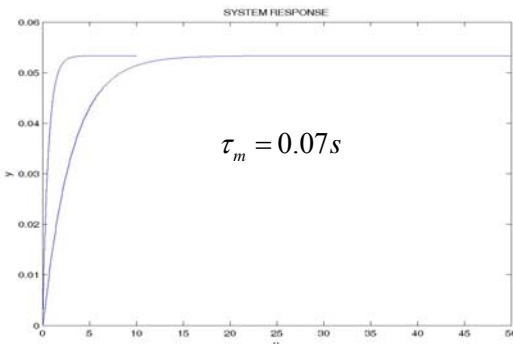
$$x[k+1] = Fx[k] + Gu[k]$$

**مثال ۲:** سیستم زیر در نظر گرفته می شود:

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1 \end{bmatrix} u(t)$$

$$y(t) = [1 \quad 0]x(t)$$

برای این سیستم کنترلر فیدبک حالت  $K = [3.75 \quad 11.5]$  قرار داده می شود. برای  $N=1$ ،  $\theta = I$ ،  $\varphi$  با استفاده از قضیه (۱)  $\tau_m \leq 2.7 \times 10^{-4} s$  و با استفاده از قضیه (۲) با بررسی  $Q$  های متفاوت  $\tau_m \leq 4.5 \times 10^{-4} s$  بدست می آید. اما با استفاده از روش آنالیز فوق مشاهده می گردد که  $\tau_m = 0.087 s$  می باشد. شکل (۴) پاسخ سیستم با  $\tau_m = 0.07 s$  را نشان می دهد همانطور که مشاهده می شود پاسخ پایدار می باشد و همچنین شکل (۵) پاسخ سیستم با  $\tau_m = 0.1 s$  را نمایش نیز نشان می دهد همانطور که انتظار می رفت پاسخ ناپایدار می باشد.



شکل (۴) - پاسخ سیستم با  $\tau_m = 0.07$

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

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

آنگاه سیستم کنترل شبکه دارای پایداری نمائی همه جایی است. [۱۰]

**قضیه ۲-** اگر  $\Lambda_{11}^T P + P \Lambda_{11} = -Q$  باشد سیستم کنترل شبکه که دینامیک آن به فرم  $\dot{z}(t) = \Lambda z(t)$  و با  $N$  گره باشد در صورتیکه ماکزیمم تاخیر مجاز  $\tau_m$  بصورت زیر باشد:

$$\tau_m \leq \min \left\{ \frac{Ln(2)}{N\|\Lambda\|}, \frac{\lambda_{\min}(Q)}{4\|\Lambda\| \left( \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} + 1 \right) N(N+1)} \right\}$$

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

آنگاه سیستم کنترل شبکه دارای پایداری نمائی همه جایی است. [۱۰]

### ۳- تاخیر:

با فرض اینکه فرض تاخیر ثابت باشد هدف فرموله کردن اثر تاخیر بر روی پلانت می باشد. همچنین تاخیر از زمان نمونه برداری کمتر در نظر گرفته می شود. روابط زیر در نظر گرفته می شوند:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), t \in [kh + t, (k+1)h + t)$$

$$y(t) = Cx(t),$$

$$u[t^+] = -Kx(t), t \in \{kh + t, k=0, 1, 2, \dots\},$$

سیستم گسسته با پیروی نمونه برداری ثابت  $h$  برای سیستم فوق به صورت زیر می باشد:

$$x[k+1] = \phi x[k] + \Gamma_0(\tau)u[k] + \Gamma_1(\tau)u[k-1],$$

$$y[k] = Cx[k],$$

که

$$\phi = e^{Ah},$$

$$\Gamma_0(\tau) = \int_0^{h-\tau} e^{As} B ds,$$

$$\Gamma_1(\tau) = \int_{h-\tau}^h e^{As} B ds.$$

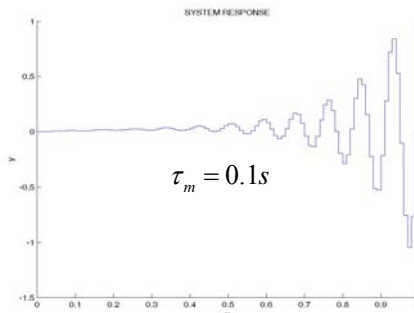
حال  $\tilde{x}[k] = [x[k], u[k-1]]^T$  را تعریف کرده روابط

زیر بدست می آیند:

بوسیله پریود نمونه برداری موثرمدل گردد به این صورت که ابتدا ماتریسهای  $F$  و  $G$  را به صورت زیر محاسبه نموده:

$$G = \int_0^{h_{eff}} e^{As} . B . ds \quad F = e^{Ah_{eff}}$$

سپس با توجه به  $F$  و  $G$  سیستم را آنالیز می شود.



شکل (۵)- پاسخ سیستم با  $\tau_m = 0.1s$

این نتایج بیانگر محافظه کارانه بودن بیش از حد قضایای ذکر شده می باشد و از آنجا که در نظر گرفتن  $\tau_m$  کوچک باعث صرف هزینه زیاد در شبکه می باشد، لزوم استفاده از الگوریتمی مناسب که تا حد امکان به واقعیت نزدیک می باشد (روش ذکر شده) نمایان می گردد. همچنین دربخش ۶ روشی را برای پایدار ماندن سیستم با تاخیرهای بالا بیان می شود.

#### ۴-اتلاف اطلاعات

ابتدا پریود نمونه برداری موثر تعریف می گردد:

$$h_{eff}(t) = \frac{th}{t - hd(t)}$$

$h$  پریود نمونه برداری نامی بر حسب ثانیه و  $d(t)$  تعداد بسته های تلف شده متعلق به پلانت تا قبل از زمان  $t$  می باشند. با بکارگیری دانش توپولوژی شبکه ، سرعت لینک ، پریود نمونه برداری و سایز بسته های اطلاعاتی می توان نرخ انتقال بسته ها را محاسبه نمود:

$$r = \min \left\{ \frac{\eta_L}{8 \sum_{i \in N} \frac{S_i}{h_i}}, 1 \right\}$$

که در آن  $\eta_L$  سرعت لینک (بر حسب بیت بر ثانیه) ،  $S_i$  سایز بسته گره  $I$  ام (بر حسب بیت)  $h_i$  پریود انتقال گره  $I$  ام و  $N$  تعداد گرههای شبکه می باشد. حال با داشتن  $r$  پریود نمونه برداری موثر را به صورت زیر محاسبه می شود:

$$h_{eff} = h/r = \min \left\{ \frac{8h \sum_{i \in N} \frac{S_i}{h_i}}{\eta_L}, h \right\}$$

پریود نمونه برداری موثر یک مقدار قابل انتظار بوده و تنها منبع ترافیکی پریودیک می باشد، [۳] بنابراین اثراتلاف اطلاعات را

#### ۵- ناحیه پایداری تاخیر و پریود نمونه برداری

برای یک سیستم کنترل شبکه با تاخیر ثابت می توان با توجه به تاثیر پریود نمونه برداری و تاخیر باندهایی را در نظر گرفت که محدودیتهای پایداری سیستم را مشخص نمایند. با استفاده از مدلهای ذکر شده برای این موارد می توان مرز ناحیه پایداری سیستم را در حالتی که به صورت شبکه مورد استفاده قرار گرفته است بدست آورده بطوریکه ناحیه مجاز برای میزان تاخیر و پریود نمونه برداری برای هر سیستم کنترل شبکه تعیین گردد.

برای این منظور ابتدا بدون در نظر گرفتن شبکه برای سیستم اولیه کنترلر را طراحی می شود سپس برای یک مقدار  $h$  ماتریسهای  $\Gamma_0, \phi, \Gamma_1$  را برای مقادیر متفاوت  $\tau$  بدست آورده شرایط پایداری را برای آنها بررسی نموده تا کمترین تاخیری که سیستم را ناپایدار می سازد بدست آید. این عمل را برای مقادیر مختلف  $h$  تکرار نموده ناحیه پایداری سیستم را به ازای تاخیر و پریود نمونه برداری تعیین می گردد. (دقت شود این روش برای تاخیرهای کوچکتر از پریود نمونه برداری ارائه شده است.)

**مثال ۳:** برای سیستم کنترل اوج هواپیما [۹] می توان ناحیه پایداری تاخیر و پریود نمونه برداری به صورت شکل (۶) بدست آورد. طرف راست منحنی ناحیه ناپایدار سیستم و طرف چپ ناحیه پایدار سیستم را به توجه به تاخیر و پریود نمونه برداری مشخص می کند.

حال به بررسی دو ناحیه می پردازیم شکل (۷) پاسخ سیستم را برای تاخیر ۰/۰۲ و پریود نمونه برداری ۰/۱ نشان می دهد که همانطور که انتظار می رفت سیستم پایدار می باشد (می توان اثر عوامل فوق را بر روی سیستم مشاهده نمود [۱۰]).

نگهداشته بطوریکه عملکرد مناسبی نیز داشته باشد، بسیار ضروری به نظر می رسد. یکی از مواردی که بوسیله آن می توان به اهداف ذکر شده دست یافت مدیریت در ارسال سیگنالهای شبکه می باشد. در این بخش دو روش برای چگونگی ارسال سیگنالها بیان میگردد.

۱- ابتدا برخی از مفاهیم بصورت زیر تعریف می گردند:  
الف: ضریب اطمینان: اگر  $\gamma$  خروجی پلانت با در نظر گرفتن شبکه و  $y_d$  نیز خروجی مطلوب (خروجی پلانت بدون در نظر گرفتن شبکه) باشند  $\sigma$  را ضریب اطمینان شبکه نامیده می شود اگر با شرط  $\|y - y_d\| \leq \sigma$  عملکرد مطلوب سیستم تضمین گردد.

ب: تاخیر کمینه: کمترین تاخیر که با توجه به ساختار شبکه برای یک سیگنال میتوان بدست آورد تاخیر کمینه آن سیگنال تعریف می گردد و با  $\tau_0$  نشان داده می شود. (دقت شود با وجود این تاخیر، عملکرد سیستم مناسب می باشد).

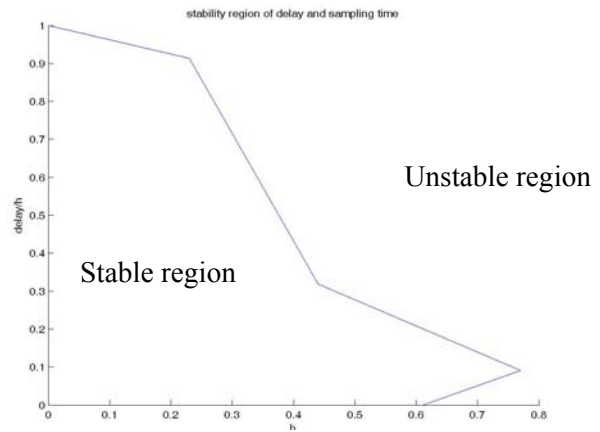
ج: مسیر بهینه: نحوه ارسالی است که سیگنال از آن طریق دارای تاخیر کمینه میگردد.

در این روش ارسال اطلاعات در شبکه بگونه ای مدیریت (برنامه ریزی) می شود که به محض آنکه شرط ضریب اطمینان برای یک سیگنال نقض گردید ارسال آن از طریق مسیر بهینه آن، تا زمانی که این شرط برای سیگنال دیگری در شبکه نقض نگردیده، انجام شود. سپس به محض نقض شدن این شرط برای سیگنال دیگر، الویت انتخاب مسیر بهینه با این سیگنال جدید می باشد. اگر دو سیگنال بطور همزمان شرط ضریب اطمینان را نقض نمودند می توان از یک اولویت بندی از پیش تعریف شده استفاده نمود.

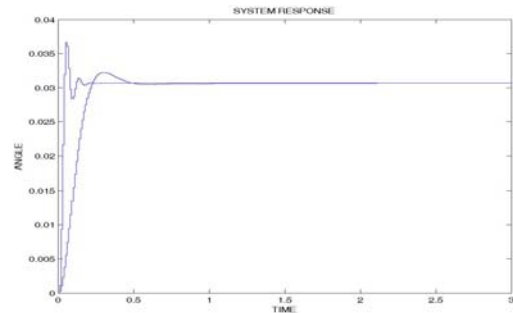
## ۲- ابتدا تعریف زیر بیان می گردد:

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) باشند  $\eta$  را ضریب اولویت سیگنال  $i$ ام می نامیم بطوریکه  $\eta = w|x_i - x_{di}|$  باشد و  $w$  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. به این ترتیب که در هر ارسال سیگنال با ضریب اولویت بالا تر ارسال می گردد. در این روش سعی میشود با مدیریت ارسال سیگنالها، خطای هر یک را

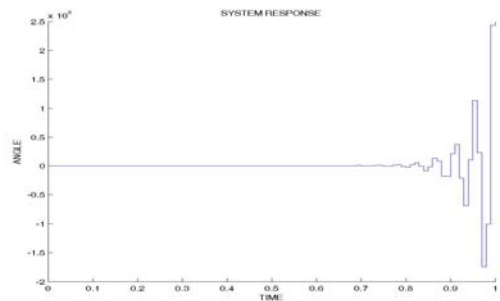


شکل (۶) - ناحیه پایداری تاخیر و پریود نمونه برداری



شکل (۷) - پاسخ سیستم با تاخیر ۰/۰۲ و پریود نمونه برداری ۰/۱

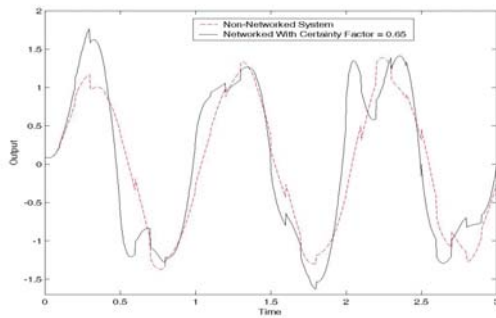
شکل (۸) پاسخ سیستم را برای تاخیر ۰/۲۵ و پریود نمونه برداری ۰/۵ نشان می دهد که در ناحیه سمت راست قرار دارد و همانطور که انتظار می رفت سیستم ناپایدار می باشد.



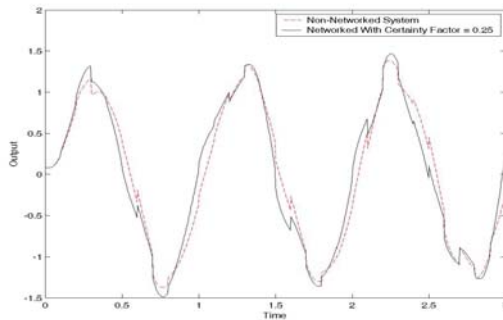
شکل (۸) - پاسخ سیستم تاخیر ۰/۲۵ و پریود نمونه برداری ۰/۵

## ۶- مدیریت ارسال اطلاعات

تا کنون سعی بر آن بوده است تا یک کران بالا برای محدود نمودن تاخیر و اتلاف اطلاعات در سیستمهای کنترل شبکه بدست آورده شود، اما 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 گرهای و سایر موارد). لذا دستیابی به الگوریتمی که بتوان بوسیله آن حداکثر امکان برای تاخیر و اتلاف اطلاعات بالا سیستم را پایدار



شکل (۹)- پاسخ سیستم با  $\sigma = .75$



شکل (۱۰)- پاسخ سیستم با  $\sigma = .25$

### نتایج :

در این مقاله قضایای مربوط به اثرات تاخیر شبکه ، با اعمال نمودن همزمان اثر تاخیر و اتلاف اطلاعات، بسط داده شده اند، همچنین روشی کاربردی برای مدل نمودن این اثرات برای بدست آوردن یک کران مناسب برای محدود نگه داشتن تاخیر و اتلاف اطلاعات، در راستای حفظ پایداری سیستم ارائه گردیده و بر این اساس ناحیه پایداری تاخیر و پریود نمونه برداری تعریف شده است.

در انتها نیز روشی برای مدیریت ارسال سیگنالها ، در جهت کاهش اثرات منفی شبکه بر پایداری سیستمهای کنترل شبکه بیان شده است.

### References:

- [1] "Stability Analysis of Networked Control Systems", by Gregory C. Walsh, Hong Ye, and Linda G. Bushnell (IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 10, NO. 3, MAY 2002).
- [2] "Analysis and Design of Networked Control Systems", by Guofeng Zhang (PHD.thesis , 2003)
- [3] "Stability Analysis of Networked Control Systems", by wei zhang (PHD.thesis , 2001).

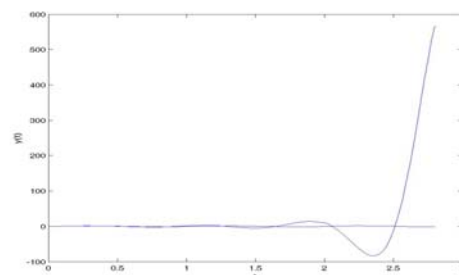
محدود نگه داریم. اگر دوسیگنال بطور همزمان دارای ضریب اولویت یکسانی گردیدند می توان از یک اولویت بندی از پیش تعریف شده استفاده نمود.

در هر دو 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.

نکته دیگری که باید در نظر گرفت، متغیر بودن میزان تاخیر در شبکه می باشد، به عبارت دیگر هیچ سیگنالی در شبکه با یک تاخیر ثابت مواجه نمی باشد. که این مورد از نقاط ضعف روشهای ذکر شده جهت محدود نگه داشتن تاخیر و اتلاف اطلاعات [۱، ۴، ۵ و ۶] بوده که با روش فوق سازگار می باشد.

**مثال ۴:** سیستم مثال (۱) را در نظر گرفته، فرض می شود که تاخیر سیستم متغیر بوده و بصورت  $\tau(t) = at + \tau_0$  در بیان گردد، با فرض  $a = 0.1$  و  $\tau_0 = 0$  عملکرد سیستم، با کنترلر  $LQG/LTR(H_2)$  ، به صورت شکل (۸) می باشد. همانطور که مشاهده می شود و انتظار می رفت، سیستم به سرعت ناپایدار میشود.

حال با تعریف  $\sigma = .75$  پاسخ سیستم به صورت شکل (۹) میباشد که همانطور که ملاحظه می شود سیستم پایدار بوده اما دارای پاسخ مناسبی نمی باشد، در این حالت بیشترین تاخیر در سیستم تا  $0.15$  ثانیه افزایش پیدا کرده است که بطور مشخص نسبت به حالتی که یک کران بالا برای تاخیر در نظر گرفته شد افزایش پیدا کرده است، که این نتیجه در سیستمهای کنترل شبکه بسیار مهم می باشد. همچنین شکل (۱۰) پاسخ سیستم را برای  $\sigma = .25$  نشان میدهد که علاوه بر آنکه سیستم پایدار بوده از رفتار مناسبی نیز برخوردار می باشد، در این حالت بیشترین خطای شبکه برابر  $0.085$  ثانیه میباشد. بنابراین می توان با یک انتخاب بهینه برای ضریب اطمینان به پاسخی بهینه برای سیستم دست یافت. [۱۰]



شکل (۸)- پاسخ سیستم برای تاخیر  $\tau(t) = 0.1t$

[4]“On the Model-Based Control of Networked Systems”, by Luis A. Montestruque and Panos J. Antsaklis(University of Notre Dame, Notre Dame, IN 46556, U.S.A. , 2003).

[5]”Stability of Networked Control Systems: Explicit Analysis of Delay”, by s.brabicky , m.phillips and wei zhang(proceedings of the American control conference Chicago, 0-7803-5519-9100\$10.00, 2001,AACC).

[6] “Stability of Networked Control Systems in the Presence of Packet Losses”, by Babak Azimi-Sadjadi , 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.

[7] “Computer networks” by S.Tanenbaum, (book,1997).

[8] “Asymptotic Behavior of networked Control Systems” , by Gregory C. Walsh , by Army Research Office under DAAH04-93-D-0002 EMURI97 Program Grant No. DAAG55-97-1-0114 , and by the National Science Foundation Grant no ECS-97-02717, 2001.

[9] ”Aircraft Pitch Attitude Control Using Backstepping ” , by Ola Harkegard and Torkel Glad(2000).

[10] ” بررسی پایداری در سیستمهای کنترل شبکه “ ، امیر علی مهاجرپور ، پروژه کارشناسی ارشد ، دانشگاه فردوسی ،