



جبران تاخیر زمانی متغیر با زمان در سیستم های کارکرد از دور با استفاده از رویکرد اغتشاش ارتباطی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدلسازی

زهرا زینلی^{۱*}، امین رضانی^۲ و سجاد ازگلی^۲

^۱ کارشناسی ارشد کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ استادیار گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۲/۱۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۳/۰۶/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۱/۳۰

چکیده

این مقاله به بررسی یک ساختار جدید برای رویکرد اغتشاش ارتباطی در سیستم کارکرد از دور می‌پردازد. در سیستم‌های دارای تاخیر ناشناخته، حفظ پایداری سیستم با استفاده از رویکرد اغتشاش امکان پذیر می‌باشد. از آنجا که این روش به مدل تاخیر زمانی نیازی ندارد، می‌تواند برای سیستم‌های کارکرد از دور که دارای کانال ارتباطی با تاخیر زمانی متغیر با زمان هستند، به کار گرفته شود. بنابراین، در این مقاله ابتدا به بررسی جبران تاخیر زمانی متغیر با زمان به وسیله رویکرد مرسوم اغتشاش پرداخته شده و شرایط طراحی رویکرد اغتشاش با استفاده از دینامیک اغتشاش شبکه شرح داده می‌شود. از طرفی خطای مدلسازی و اغتشاش خارجی باعث ایجاد خطای حالت ماندگار خواهد شد. از اینرو، در این مقاله با بررسی تاثیر اغتشاش خارجی و عدم قطعیت در مدلسازی بر روی مشخصه‌های حالت ماندگار، ساختار مرسوم رویکرد اغتشاش اصلاح شده و ساختار دیگری برای رویکرد اغتشاش در سیستم کارکرد از دور پیشنهاد شده است که با به‌کارگیری سیگنال گشتاور تاخیر یافته ربات فرمانبر به جای سیگنال موقعیت تاخیر یافته آن به عنوان یکی از ورودی‌های رویکرد اغتشاش، خطای حالت ماندگار حذف می‌شود. همچنین کارآمد بودن روش پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: سیستم کارکرد از دور؛ تاخیر زمانی؛ اغتشاش شبکه؛ رویکرد اغتشاش ارتباطی.

Time-varying delay compensation by communication disturbance observer for teleoperation systems by considering model uncertainty

Z. Zeinaly^{1,*}, A. Ramezani² and S. Ozgoli²

¹ M.Sc in Control Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Ph.D in Control Systems Theory, Assist. Prof., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

This paper studies novel structure of communication disturbance observer for teleoperation systems. In time-delayed systems that time delay is unknown, stability of system is provided by communication disturbance observer (CDOB). Since this method works without time-delay model, it can be implemented in teleoperation systems that contain communication channel with time-varying delay. So, in this paper, first, time varying delay compensation by conventional communication disturbance observer is studied. Also, design conditions of the conventional communication disturbance observer by using dynamic property of network disturbance are explained. However, the system model error and disturbance cause steady-state error. Hence, in this paper, by considering the effects of model uncertainty and disturbance on the steady state characteristics, structure of the conventional communication disturbance observer is modified and another structure for CDOB in teleoperation systems has been proposed. By using slave's delayed torque instead of its delayed position as one of the observer's input, steady state error is eliminated. Also, simulation results are presented to demonstrate the effectiveness of the proposed structure.

Keywords: Teleoperation system; Time delay; Network disturbance; Communication disturbance observer.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۶۳۷۱۵۲۷۳

آدرس پست الکترونیک: zahra_zeinaly@yahoo.com

۱- مقدمه

کارکرد از دور^۱ یک کاربرد رباتیک است که دو سیستم فرمانده^۲ و فرمانبر^۳ را توصیف می‌کند که بر یکدیگر و همچنین بر محیط، اثر متقابل دارند. به طور دقیق سیستم کارکرد از دور از پنج بخش تشکیل شده است: کاربر، ربات فرمانده، کانال ارتباطی، ربات فرمانبر و محیط. سیستم فرمانده اغلب یک مانیپولاتور است که توسط کاربر به کار انداخته می‌شود. سیستم فرمانبر یک ربات است که با فاصله از سیستم فرمانده قرار گرفته است و توسط دستوراتی که از سیستم فرمانده دریافت می‌کند کنترل می‌شود و بر محیطی که بر روی آن کار می‌کند اثر می‌گذارد [۱]. کانال ارتباطی که برای انتقال اطلاعات بین فرمانده و فرمانبر استفاده می‌شود، دارای تأخیر زمانی است که تأخیر به دلیل دارا بودن مشخصه غیرکمینه فاز، موجب ناپایداری و تنزل در عملکرد سیستم می‌شود. بنابراین حفظ پایداری سیستم در حضور تأخیر زمانی به عنوان یک موضوع مهم در بسیاری از تحقیقات مطرح بوده است. یکی از روش‌های مفید برای پایدارسازی سیستم‌های کارکرد از دور با تأخیر زمانی ثابت، رویکرد مبتنی بر کنش‌ناپذیری^۴ است که پایدارسازی سیستم کارکرد از دور را با استفاده از نظریه پراکندگی^۵ امکان‌پذیر می‌سازد [۲]. روش‌های دیگر برای حفظ پایداری سیستم در حضور تأخیر زمانی، رویکرد متغیر موج [۳ و ۴]، کنترل H_{∞} [۵] و رویکرد پیش‌بین مدل [۶]، است.

یکی از روش‌هایی که بسیار برای جبران تأخیر به کار گرفته می‌شود، استفاده از پیش‌بین اسمیت است که ساختار ساده‌ای داشته و به آسانی قابل پیاده‌سازی است [۷]. پیش‌بین اسمیت با استفاده از مدل دقیق تأخیر و مدل سیستم اثر تأخیر را جبران کرده و پایداری سیستم را حفظ می‌کند. بنابراین برای استفاده از پیش‌بین اسمیت باید مدلی دقیق از تأخیر داشته باشیم. همچنین در صورت وجود خطای مدلسازی پیش‌بین قادر به حذف اثر تأخیر نیست. از طرفی تأخیر موجود در شبکه اینترنت نمونه‌ای از تأخیر متغیر با

زمان است که مدلی دقیق برای آن وجود ندارد. پس در مواردی که تأخیر متغیر با زمان و ناشناخته باشد نمی‌توان از پیش‌بین اسمیت برای جبران تأخیر استفاده کرد. از اینرو، روشی جدید برای جبران تأخیر زمانی در سیستم‌های تأخیردار بر اساس مفهوم اغتشاش شبکه (ND)^۶ و با استفاده از رویکرد اغتشاش ارتباطی (CDOB)^۷ معرفی شده است [۸] و [۹]. مزیت این روش این است که برای جبران تأخیر به مدل تأخیر نیاز ندارد، بنابراین می‌تواند برای سیستم‌هایی که دارای تأخیر ناشناخته و متغیر با زمان هستند، نیز به کار رود [۱۰]. در این روش، رویکرد اغتشاش ارتباطی تأثیر تأخیر را به عنوان نوعی اغتشاش نیرو در نظر گرفته و با تخمین این اغتشاش اثر تأخیر را حذف می‌کند [۱۱]. البته این روش به خطای مدلسازی و اغتشاش‌های خارجی مقاوم نیست و در صورت وجود عدم قطعیت مدل، سیگنال پاسخ ربات فرمانبر دارای خطای حالت ماندگار شده و ردیابی از سیگنال دستور انجام نخواهد شد. در [۱۱] ساختار مرسوم رویکرد اغتشاش برای سیستم‌های تأخیردار اصلاح شده و برای دستیابی به پایداری مقاوم در برابر عدم قطعیت مدل، ساختار جدیدی برای رویکرد اغتشاش معرفی شده است که در آن اغتشاش شبکه از ورودی گشتاور سیستم و ورودی گشتاور تأخیر یافته سیستم محاسبه می‌شود. در واقع در ساختار معرفی شده برای رویکرد اغتشاش در [۱۱] برخلاف ساختار مرسوم رویکرد اغتشاش ارتباطی، از سیگنال ورودی تأخیر یافته سیستم به جای سیگنال خروجی تأخیر یافته به عنوان ورودی رویکرد و برای تخمین اغتشاش شبکه استفاده شده است. سپس در [۱۲] عملکرد رویکرد معرفی شده در [۱۱]، در حضور اغتشاش خارجی ضربه بررسی شده است. در این مقاله بر اساس ساختار معرفی شده برای رویکرد اغتشاش در [۱۱] ساختار دیگری برای رویکرد اغتشاش ارتباطی در سیستم کارکرد از دور پیشنهاد شده است. زیرا از آنجا که گشتاور ربات فرمانبر به طور دقیق با گشتاور تأخیر یافته ربات فرمانده برابر نیست، نمی‌توان آن را مانند ورودی گشتاور تأخیر یافته در یک سیستم تأخیردار عادی در نظر گرفته و مستقیماً از آن به عنوان یکی از ورودی‌های رویکرد استفاده

¹ Teleoperation² Master³ Slave⁴ Passivity⁵ Scattering theory⁶ Network disturbance⁷ Communication disturbance observer

سیستم دارای تاخیر بیان می‌کنیم. این مفهوم، پایه روش استفاده شده در این پژوهش برای جبران تاخیر است [۹].

شکل ۱(الف) یک سیستم دارای تاخیر با تاخیرهای ورودی و خروجی را نشان می‌دهد. معادلات حالت و خروجی سیستم به فرم معادلات (۱) و (۲) بیان می‌شوند. در این معادلات، x بردار حالت، u ورودی و y خروجی است. همچنین T_1 تاخیر ورودی و T_2 تاخیر خروجی است.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t - T_1) \quad (1)$$

$$y(t) = \mathbf{c}\mathbf{x}(t - T_2) \quad (2)$$

شرایط اولیه به صورت معادله (۳) در نظر گرفته می‌شود.

$$\mathbf{x}(0) = 0 \quad (3)$$

با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادلات (۱) و (۲) معادلات (۴) و (۵) حاصل شده‌اند.

$$s\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{b}U(s)e^{-T_1s} \quad (4)$$

$$Y(s) = \mathbf{c}\mathbf{X}(s)e^{-T_2s} \quad (5)$$

با استفاده از معادلات (۴) و (۵) تابع انتقال بین ورودی و خروجی سیستم به صورت معادله (۶) خواهد شد.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \mathbf{c}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{b}e^{-T_1s}e^{-T_2s} = G(s)e^{-Ts} \quad (6)$$

در معادله (۶)، T مجموع تاخیر ورودی و خروجی است. با در نظر گرفتن رابطه بین ورودی و خروجی، سیستم شکل

۱(الف) را می‌توان به صورت شکل ۱(ب) در نظر گرفت. در

شکل ۱(ب) بلوک تاخیر زمانی به صورت سری با سیستم وجود ندارد بلکه به جای آن اغتشاشی وجود دارد که شامل تاخیر است. این اغتشاش به عنوان اغتشاش شبکه تعریف می‌شود که در حوزه زمان و حوزه لاپلاس به صورت معادلات (۷) و (۸) بیان می‌شوند.

$$d_{net}(t) = u(t) - u(t - T) \quad (7)$$

$$D_{net}(s) = U(s) - U(s)e^{-Ts} \quad (8)$$

معادلات حالت و خروجی برای شکل ۱(ب) به صورت معادلات (۹) و (۱۰) بیان می‌شوند.

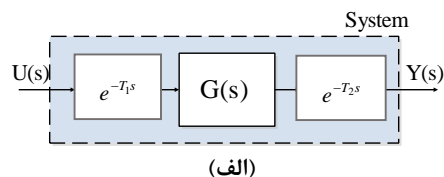
$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) - \mathbf{b}d_{net}(t) \quad (9)$$

$$y(t) = \mathbf{c}\mathbf{x}(t) \quad (10)$$

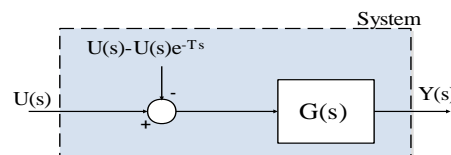
با جایگزین کردن اغتشاش شبکه از معادله (۷) در معادله (۹) این معادله به فرم معادله (۱۱) تبدیل می‌شود.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t) - \mathbf{b}(u(t) - u(t - T)) \\ &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t - T) \end{aligned} \quad (11)$$

با گرفتن تبدیل لاپلاس از معادلات (۱۰) و (۱۱) تابع انتقال



(الف)



(ب)

شکل ۱- مفهوم اغتشاش شبکه. الف) سیستم با تاخیر زمانی، ب) سیستم با اغتشاش شبکه

کرد، بنابراین در صورت به کارگیری رویکرد اغتشاش ارتباطی معرفی شده در [۱۱] برای سیستم کارکرد از دور تخمین اغتشاش به خوبی انجام نشده و عملکرد مطلوب حاصل نمی‌شود. از اینرو در این مقاله ساختار معرفی شده برای رویکرد اغتشاش در [۱۱] به منظور استفاده در سیستم کارکرد از دور با تاخیر متغیر زمان بهبود یافته تا پایداری سیستم کارکرد از دور با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل و همچنین در حضور اغتشاش خارجی حفظ شده و خطای حالت ماندگار نیز حذف شود.

این مقاله به ترتیب زیر تنظیم شده است. در بخش ۲ مفهوم اغتشاش شبکه بیان می‌شود. در بخش ۳ رویکرد اغتشاش ارتباطی معرفی شده و چگونگی طراحی این رویکرد، تخمین اغتشاش شبکه و همچنین چگونگی جبران تاخیر در سیستم کارکرد از دور توسط این رویکرد و تاثیر عدم قطعیت مدل و اغتشاش خارجی بر مشخصات حالت ماندگار شرح داده می‌شود. بخش ۴ به بررسی ساختار رویکرد اغتشاش پیشنهادی در این مقاله پرداخته و تاثیر عدم قطعیت مدل و اغتشاش خارجی بر مشخصات حالت ماندگار در این ساختار نیز بررسی می‌شود. در بخش ۵ نتایج شبیه‌سازی برای سیستم کارکرد از دور با هر دو ساختار رویکرد اغتشاش ارتباطی مرسوم و رویکرد اغتشاش ارتباطی پیشنهادی ارائه شده است. سرانجام، بخش ۶ به نتیجه‌گیری کلی می‌پردازد.

۲- مفهوم اغتشاش شبکه

در این بخش مفهوم اغتشاش شبکه را با یک مثال ساده از

برای رویتر اغتشاش ارتباطی مرتبه اول، اغتشاش شبکه با یک ثابت تقریب زده می‌شود. بنابراین معادله دیفرانسیل (۱۳) به آن اختصاص داده شده است.

$$\dot{d}_{net}(t) = 0 \quad (13)$$

برای رویتر اغتشاش ارتباطی مرتبه دوم، اغتشاش شبکه با یک چند جمله‌ای مرتبه اول تقریب زده می‌شود. بنابراین معادله دیفرانسیل آن به صورت معادله (۱۴) می‌شود.

$$\ddot{d}_{net}(t) = 0 \quad (14)$$

بنابراین با توجه به معادلات (۱۳) و (۱۴)، معادلات (۹) و (۱۰) به معادلات (۱۵) و (۱۶) تبدیل می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{d}_{net}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0_{2 \times n} & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ d_{net}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} u(t) \quad (15)$$

$$y(t) = [c \quad 0_{1 \times 2}] \begin{bmatrix} x(t) \\ d_{net}(t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

در معادلات (۱۵) و (۱۶)، $0_{2 \times n}$ یک ماتریس صفر با ابعاد $2 \times n$ است. $0_{2 \times 1}$ یک بردار صفر با ابعاد 2×1 و $0_{1 \times 2}$ یک بردار صفر با ابعاد 1×2 است. ماتریس B نیز به صورت معادله (۱۷) است.

$$B = [-b \quad 0_{n \times 1}] \quad (17)$$

ماتریس E نیز در مورد رویتر اغتشاش ارتباطی مرتبه اول به صورت معادله (۱۸) و در مورد رویتر اغتشاش ارتباطی مرتبه دوم به صورت معادله (۱۹) است.

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

بنابراین رویتر اغتشاش ارتباطی به صورت معادلات (۲۰) و معادله (۲۱) است.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{\hat{d}}_{net}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0_{2 \times n} & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{d}_{net}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0_{2 \times 1} \end{bmatrix} u(t) + k(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (20)$$

$$\hat{y}(t) = [c \quad 0_{1 \times 2}] \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{d}_{net}(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

در معادله (۲۰)، k بردار بهره رویتر است. در این مورد، رویتر اغتشاش ارتباطی می‌تواند با روش Gopinath ساخته

بین ورودی و خروجی شکل ۱(ب) به صورت معادله (۱۲) حاصل می‌شود.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = c(sI - A)^{-1} b e^{-Ts} = G(s) e^{-Ts} \quad (12)$$

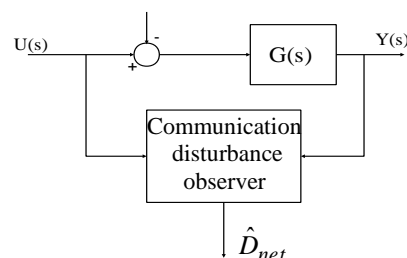
بنابراین با توجه به یکسانی معادله (۱۲) با معادله (۶)، می‌توان سیستم با تاخیر زمانی را معادل با سیستم دارای اغتشاش شبکه در نظر گرفت.

۳- رویتر اغتشاش ارتباطی مرسوم

در این بخش ابتدا رویتر اغتشاش ارتباطی مرسوم که برای تخمین اغتشاش شبکه به کار می‌رود معرفی شده و شرایط طراحی این رویتر بیان شده است. همچنین چگونگی جبران تاخیر در سیستم کارکرد از دور توسط این رویتر اغتشاش و تاثیر عدم قطعیت مدل و اغتشاش خارجی ضربه بر مشخصه حالت ماندگار در این ساختار نیز شرح داده شده است.

۳-۱- معرفی رویتر اغتشاش ارتباطی

شکل ۲ دیاگرام کلی تخمین اغتشاش شبکه را در یک سیستم تاخیردار توسط رویتر اغتشاش ارتباطی نشان می‌دهد. برای ساخت این رویتر اغتشاش، با توجه به اینکه رویتر، قادر به تخمین متغیرهای حالت رویت‌پذیر می‌باشد، اغتشاش شبکه باید به عنوان یک متغیر حالت رویت‌پذیر رفتار کند تا توسط رویتر اغتشاش تخمین زده شود. بنابراین با اختصاص معادلات دیفرانسیل مختلف به اغتشاش شبکه در هر دو مورد رویتر اغتشاش مرتبه اول و مرتبه دوم، معادلات حالت و خروجی سیستم با اغتشاش شبکه یعنی معادلات (۹) و (۱۰) تغییر شکل می‌یابند و سپس رویتر اغتشاش برای تخمین اغتشاش شبکه به دست می‌آید [۹].



شکل ۲- دیاگرام کلی تخمین اغتشاش شبکه توسط رویتر اغتشاش ارتباطی

شود که اغتشاش شبکه تخمین زده شده توسط رویتر اغتشاش ارتباطی مرتبه اول، از معادله (۲۲) و توسط رویتر اغتشاش ارتباطی مرتبه دوم، از معادله (۲۳) به دست می‌آید [۹].

$$\hat{D}_{net}(s) = \frac{g_{net}}{s + g_{net}} D_{net}(s) \quad (22)$$

$$\hat{D}_{net}(s) = \frac{k_1}{s^2 + k_2s + k_1} D_{net}(s) \quad (23)$$

در معادله (۲۲)، g_{net} فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر در رویتر اغتشاش ارتباطی است. در معادله (۲۳) پارامترهای k_1 و k_2 به صورت معادلات (۲۴) و (۲۵) هستند.

$$k_1 = \omega_{ndob}^2 \quad (24)$$

$$k_2 = 2\zeta_{cdob}\omega_{ndob} \quad (25)$$

که ω_{ndob} فرکانس زاویه‌ای نامیرا و ζ_{cdob} ضریب میرایی مربوط به فیلتر پایین‌گذر در رویتر اغتشاش ارتباطی است.

۳-۲- طراحی رویتر اغتشاش ارتباطی مرسوم

در این بخش با استفاده از ویژگی دینامیک اغتشاش شبکه دو شرطی که برای طراحی رویتر اغتشاش ارتباطی در [۹] معرفی شده است، بیان می‌شود. المان تاخیر با استفاده از تقریب پد^۱ به فرم معادله (۲۶) تقریب زده می‌شود.

$$e^{-Ts} = \frac{1 + \sum_{i=1}^m \frac{m(m-1)\dots(m-i+1)}{(m+n)\dots(m+n-i+1)} \frac{1}{i!} (-Ts)^i}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{n(n-1)\dots(n-i+1)}{(m+n)\dots(m+n-i+1)} \frac{1}{i!} (Ts)^i} \quad (26)$$

بنابراین رابطه اغتشاش شبکه در معادله (۸) با این تقریب به معادله (۲۷) تبدیل می‌شود.

$$D_{net}(s) = U(s)(1 - P_{mn}(s)) = U(s) \frac{n(s)}{d(s)} \quad (27)$$

در نهایت، قطب‌های اغتشاش شبکه از معادله (۲۸) محاسبه می‌شوند.

$$d(s) = 0 \quad (28)$$

۳-۲-۱- شرط اول طراحی

شرط اول طراحی در مورد فاصله بین قطب‌ها تا مبدا در صفحه مختلط است. این شرط بیان می‌کند که قسمت

حقیقی قطب‌های رویتر اغتشاش ارتباطی باید کوچکتر از قطب‌های اغتشاش شبکه باشد. زیرا همگرایی خطای تخمین اغتشاش شبکه توسط رویتر اغتشاش ارتباطی باید سریعتر از دینامیک اغتشاش شبکه باشد. بنابراین شرط اول طراحی باید معادله (۲۹) را برآورده کند.

$$\text{Re}[p_{cdob}] < \text{Re}[p_{nd}] \quad (29)$$

برای رویتر اغتشاش مرتبه اول، قطب رویتر با توجه معادله (۲۲) برابر با معادله (۳۰) می‌شود.

$$p = -g_{net} \quad (30)$$

برای رویتر اغتشاش مرتبه دوم، قطب‌های رویتر با توجه به معادله (۲۳) برابر با معادله (۳۱) می‌شوند.

$$p_1, p_2 = \frac{-k_2 \pm j\sqrt{k_2^2 - 4k_1}}{2} \quad (31)$$

بنابراین، شرط اول طراحی برای رویتر اغتشاش مرتبه اول و مرتبه دوم به ترتیب برابر با معادلات (۳۲) و (۳۳) است.

$$-g_{net} < \text{Re}[p_{nd}] \Leftrightarrow g_{net} > -\text{Re}[p_{nd}] \quad (32)$$

$$-\frac{k_2}{2} < \text{Re}[p_{nd}] \Leftrightarrow k_2 > -2\text{Re}[p_{nd}] \quad (33)$$

۳-۲-۲- شرط دوم طراحی

شرط دوم در مورد ضریب میرایی است. بنابراین فقط در مورد رویتر اغتشاش مرتبه دوم به کار می‌رود. این شرط بیان می‌کند ضریب میرایی رویتر اغتشاش ارتباطی باید از ضریب میرایی اغتشاش شبکه کوچکتر باشد، زیرا پاسخ گذرای رویتر اغتشاش ارتباطی باید سریعتر از دینامیک اغتشاش شبکه باشد. با تقریب پد از مرتبه دوم برای تاخیر، اغتشاش شبکه به صورت معادله (۳۴) خواهد شد.

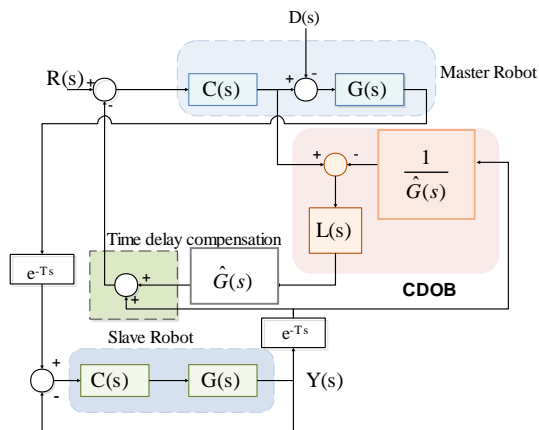
$$D_{net}(s) = U(s)(1 - P_{22}(s)) = U(s) \left(\frac{\frac{12}{T}s}{s^2 + \frac{6}{T}s + \frac{12}{T^2}} \right) \quad (34)$$

مخرج معادله (۳۴) یک چندجمله‌ای مرتبه دو به صورت معادله (۳۵) است که از آن می‌توان ضریب میرایی اغتشاش شبکه را به دست آورد.

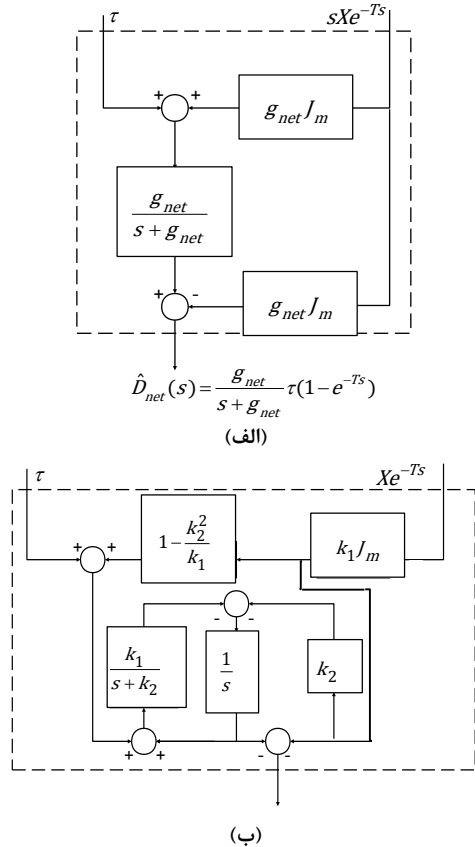
$$s^2 + \frac{6}{T}s + \frac{12}{T^2} = s^2 + 2\zeta_{nd}\omega_{nd}s + \omega_{nd}^2 \quad (35)$$

شرط دوم برای طراحی رویتر اغتشاش ارتباطی مرتبه دوم باید معادله (۳۶) را برآورده کند.

1. Pade approximation



شکل ۳- جبران تاخیر با رویکرد اغتشاش ارتباطی مرسوم



شکل ۴- ساختار داخلی رویکرد اغتشاش ارتباطی در سیستم کارکرد از دور الف) رویکرد اغتشاش مرتبه اول ب) رویکرد اغتشاش مرتبه دوم

۳-۴- عدم قطعیت مدل

در این بخش برای نشان دادن تاثیر عدم قطعیت مدل بر روی خطای حالت ماندگار در سیستم کارکرد از دور با رویکرد اغتشاش

$$\zeta_{cdob} < \zeta_{nd} \quad (36)$$

بنابراین برای طراحی رویکرد اغتشاش ارتباطی باید دو شرط طراحی یعنی معادله (۳۲) برای رویکرد اغتشاش ارتباطی مرتبه اول و معادلات (۳۳) و (۳۶) برای رویکرد اغتشاش مرتبه دوم برآورده شود.

۳-۳- جبران تاخیر توسط رویکرد اغتشاش ارتباطی

مرسوم

در این بخش چگونگی جبران تاخیر در سیستم کارکرد از دور توسط رویکرد اغتشاش ارتباطی شرح داده می‌شود. شکل ۳ چگونگی جبران تاخیر در سیستم کارکرد از دور توسط رویکرد اغتشاش ارتباطی و شکل ۴ به صورت دقیقتر ساختار داخلی رویکردهای اغتشاش مرتبه اول و دوم را در سیستم کارکرد از دور نشان می‌دهند. در شکل ۳، $R(s)$ و $Y(s)$ به ترتیب ورودی مرجع و خروجی هستند که در سیستم کارکرد از دور، ورودی، سیگنال دستوری است که کاربر به ربات فرمانده اعمال می‌کند و خروجی، سیگنال موقعیت ربات فرمانبر است. $C(s)$ ، $G(s)$ و $\hat{G}(s)$ نیز به ترتیب کنترل‌کننده، تابع تبدیل ربات‌ها و مدل تابع تبدیل ربات‌ها هستند. $L(s)$ نیز فیلتر پایین‌گذر در رویکرد اغتشاش ارتباطی برای تخمین اغتشاش شبکه است. در شکل ۴ نیز J_m مدل اینرسی ربات می‌باشد. اکنون برای به‌دست آوردن تابع تبدیل حلقه بسته شکل ۳ فرض می‌کنیم که رویکرد اغتشاش ارتباطی به طور ایده‌آل اغتشاش شبکه را تخمین می‌زند. یعنی فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر برابر با بی‌نهایت و $|L(s)|=1$ است بنابراین تابع تبدیل حلقه بسته سیستم شکل ۳ به صورت معادله (۳۷) است. همانطور که از معادله (۳۷) مشاهده می‌شود در معادله مشخصه سیستم یعنی مخرج تابع تبدیل حلقه بسته تاخیر وجود ندارد. از آنجا که تاخیر منجر به ناپایداری سیستم می‌شود، بنابراین با این روش اثر تاخیر توسط رویکرد اغتشاش ارتباطی جبران شده است و سیستم کارکرد از دور حتی با حضور تاخیر پایدار می‌ماند.

$$G_{closed}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C^2(s)G^2(s)e^{-Ts}}{1 + C(s)G(s) + C(s)\hat{G}(s) + C(s)G(s)\hat{G}(s)} \quad (37)$$

باشد یعنی $D(s)=1$ ، پاسخ حالت ماندگار با استفاده از معادله (۴۴) به صورت معادله (۴۵) بدست می‌آید.

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{-C^2(s)G^2(s)e^{-Ts}(1+C(s)\hat{G}(s))}{1+C(s)\hat{G}(s)+C(s)G(s)+C^2(s)G(s)\hat{G}(s)} \quad (44)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} sY(s) \rightarrow -\infty \quad (45)$$

بنابراین با ساختار مرسوم رویتگر اغتشاش ارتباطی، اغتشاش ضربه وارد شده به ربات فرمانده باعث ایجاد خطای حالت ماندگار بسیار زیادی شده و سیگنال پاسخ نمی‌تواند سیگنال دستور را ردیابی کند.

۴- ساختار پیشنهادی برای رویتگر اغتشاش ارتباطی در سیستم کارکرد از دور

در [۱۱] برای دستیابی به پایداری مقاوم در یک سیستم تاخیردار ساختار جدیدی برای رویتگر اغتشاش معرفی شده است که در آن رویتگر اغتشاش، مقدار اغتشاش شبکه را با استفاده از ورودی گشتاور سیستم و ورودی گشتاور تاخیر یافته سیستم محاسبه می‌کند. در حقیقت یکی از ورودی‌های رویتگر اغتشاش به جای خروجی تاخیر یافته سیستم، به ورودی گشتاور تاخیر یافته سیستم تغییر داده شده است تا اغتشاش ایجاد شده توسط عدم قطعیت مدل در تخمین اغتشاش شبکه تاثیری نداشته باشد. البته اعمال ساختار معرفی شده برای رویتگر اغتشاش در [۱۱] به سیستم کارکرد از دور به پایداری سیستم منجر نشده و عملکرد مطلوبی را تامین نمی‌کند. زیرا اگرچه گشتاور ربات فرمانده به عنوان ورودی گشتاور در نظر گرفته می‌شود ولی گشتاور ربات فرمانبر نمی‌تواند به عنوان ورودی گشتاور تاخیر یافته در نظر گرفته شود، چرا که گشتاور ربات فرمانبر به طور دقیق با گشتاور تاخیر یافته ربات فرمانده یکسان نیست. از اینرو، در این مقاله ساختار معرفی شده برای رویتگر اغتشاش در [۱۱] برای به‌کارگیری در سیستم کارکرد از دور تغییر داده شده و با محاسبه گشتاور تاخیر یافته ربات فرمانبر از سیگنال موقعیت تاخیر یافته آن، اغتشاش شبکه برای جبران تاخیر از گشتاور ربات فرمانده و گشتاور تاخیر یافته ربات فرمانبر به جای موقعیت تاخیر یافته آن محاسبه می‌شود.

دیگرام ساختار پیشنهادی برای رویتگر اغتشاش و چگونگی جبران تاخیر در سیستم کارکرد از دور در شکل ۵ نشان داده شده است. تابع انتقال حلقه بسته سیستم شکل ۵ به صورت معادله (۵۰) می‌باشد.

ارتباطی مرسوم، دو مانیپولاتور چرخشی یک درجه آزادی با مدل خطی توصیف شده با معادله (۳۸) به عنوان ربات‌های فرمانده و فرمانبر در نظر گرفته شده‌اند.

$$Js^2 = \tau \quad (38)$$

بطوریکه، J اینرسی و τ گشتاور ربات می‌باشد. کنترل‌کننده $C(s)$ ، تابع تبدیل ربات‌ها $G(s)$ و مدل تابع تبدیل ربات‌ها $\hat{G}(s)$ به ترتیب به صورت معادلات (۳۹) تا (۴۱) بیان می‌شوند.

$$C(s) = J_m(K_p + K_v s) \quad (39)$$

$$G(s) = \frac{1}{Js^2} \quad (40)$$

$$\hat{G}(s) = \frac{1}{J_m s^2} \quad (41)$$

به طوریکه J_m ، K_p ، K_v به ترتیب مدل اینرسی، بهره تناسبی و بهره مشتقی کنترل‌کننده هستند. تفاوت J و J_m به عنوان عدم قطعیت مدل تعریف می‌شود. با توجه به تابع تبدیل حلقه بسته، تابع خطا به صورت معادله (۴۲) حاصل می‌شود.

$$E(s) = (1 - G_{closed}(s))R(s) \quad (42)$$

با جایگزینی معادله (۳۷) و معادلات (۳۹) تا (۴۱) در معادله (۴۲)، خطای حالت ماندگار زمانیکه سیگنال دستور پله واحد باشد به صورت معادله (۴۳) به دست می‌آید.

$$\lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \rightarrow 1 - \frac{J_m}{J} \quad (43)$$

بنابراین، در صورت وجود عدم قطعیت مدل، با استفاده از ساختار مرسوم رویتگر اغتشاش ارتباطی خطای حالت ماندگار وجود داشته و عملکرد سیستم مطلوب نمی‌باشد.

۳-۵- اغتشاش خارجی

در این بخش تاثیر اغتشاش ضربه روی مشخصات حالت ماندگار برای ساختار مرسوم رویتگر اغتشاش ارتباطی مطالعه شده است. این اغتشاش می‌تواند به طور ناخواسته توسط کاربر به ربات فرمانده اعمال شود. در شکل ۳، $D(s)$ اغتشاش وارد شده به ربات فرمانده است. برای نشان دادن تاثیر این اغتشاش بر روی خروجی فرض می‌شود که رویتگر اغتشاش ارتباطی به طور ایده آل اغتشاش شبکه را تخمین می‌زند، به طوریکه $|L(s)|=1$ است. بنابراین تاثیر اغتشاش روی خروجی به صورت معادله (۴۴) می‌باشد. در حالتی که اغتشاش ضربه

$$G_{closed}(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C^2(s)G^2(s)e^{-Ts}}{1+C(s)G(s)+C(s)\hat{G}(s)+C^2(s)G(s)\hat{G}(s)+C^2(s)G^2(s)e^{-2Ts}-C^2(s)G(s)\hat{G}(s)e^{-2Ts}} \quad (50)$$

$$\frac{Y(s)}{D(s)} = \frac{-C(s)G^2(s)e^{-Ts}}{1+C(s)G(s)+C(s)\hat{G}(s)+C^2(s)G(s)\hat{G}(s)+C^2(s)G^2(s)e^{-2Ts}-C^2(s)G(s)\hat{G}(s)e^{-2Ts}} \quad (52)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} sY(s) \rightarrow 0 \quad (53)$$

بنابراین با توجه به معادله (۵۳)، با ساختار پیشنهادی برای رویتر اغتشاش ارتباطی، برخلاف ساختار مرسوم رویتر اغتشاش، اغتشاش خارجی ضربه بر روی ربات فرمانده، موجب ایجاد خطای حالت ماندگار در سیگنال پاسخ نخواهد شد. همچنین سیستم پایدار مانده و عملکرد ردیابی ربات فرمانبر از ربات فرمانده و سیگنال دستور حاصل می‌شود.

۵- شبیه سازی

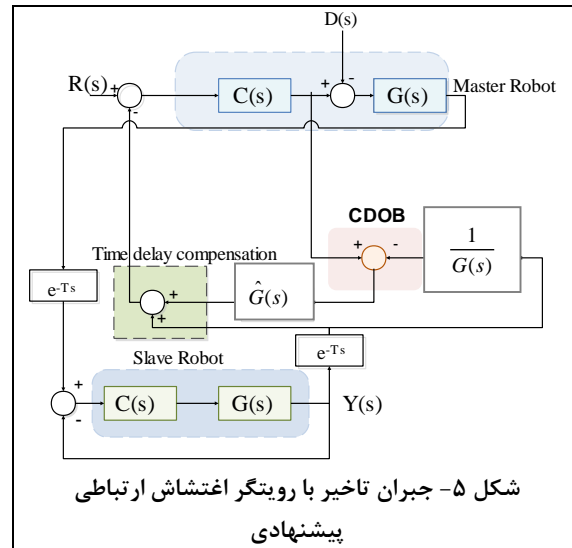
در این بخش نتایج شبیه‌سازی برای مقایسه عملکرد دو رویتر اغتشاش ارتباطی مرسوم مرتبه اول و دوم و رویتر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی در این مقاله در جبران تاثیر تاخیر متغیر با زمان موجود در کانال ارتباطی سیستم کارکرد از دور در حضور عدم قطعیت و اغتشاش خارجی ضربه، ارائه شده است. همچنین پایداری سیستم کارکرد از دور با رویتر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی بررسی شده است.

در این مقاله برای ربات‌های فرمانده و فرمانبر، دو مانیپولاتور خطی یک درجه آزادی با مدل معادله (۳۸) و برای کنترل‌کننده یک کنترل‌کننده تناسبی-مشتقی با معادله (۳۹) در نظر گرفته شده است. تاخیر متغیر با زمان موجود در کانال ارتباطی نیز به صورت توزیع تصادفی یکنواخت به فرم معادله (۵۴) در نظر گرفته شده که این تاخیر در شکل ۶ نشان داده است.

$$250 \text{ ms} \leq T:\text{random} \leq 350 \text{ ms} \quad (54)$$

۵-۱- بررسی پایداری سیستم کارکرد از دور با رویتر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی

در تابع تبدیل حلقه بسته سیستم کارکرد از دور با ساختار پیشنهادی برای رویتر اغتشاش در معادله (۵۰) قسمت تاخیر موجود در معادله مشخصه، ممکن است بر پایداری سیستم تاثیر منفی گذارد. به همین دلیل در این بخش



۴-۱- عدم قطعیت مدل

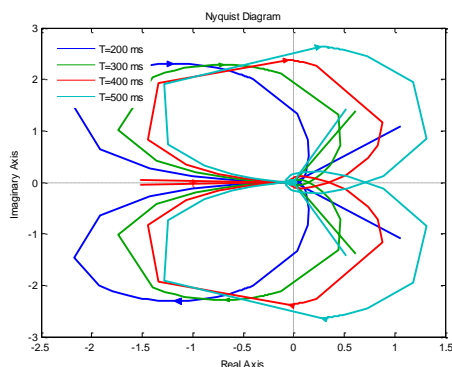
با استفاده از معادله (۴۲) تابع خطا حاصل شده و سپس با استفاده از قضیه مقدار نهایی، خطای حالت ماندگار برای سیستم شکل ۵ در حالتی که سیگنال دستور پله واحد می‌باشد، به صورت معادله (۵۱) به دست می‌آید.

$$\lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \rightarrow 0 \quad (51)$$

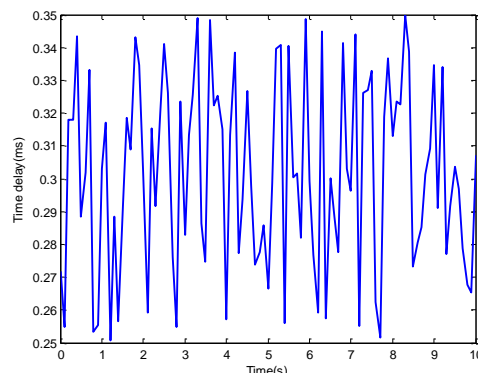
بنابراین بر اساس معادله (۵۱) در سیستم کارکرد از دور با ساختار پیشنهادی برای رویتر اغتشاش ارتباطی، عدم قطعیت مدل بر روی خطای حالت ماندگار تاثیری نداشته و پایداری مقاوم برای سیستم حاصل می‌شود.

۴-۲- اغتشاش خارجی

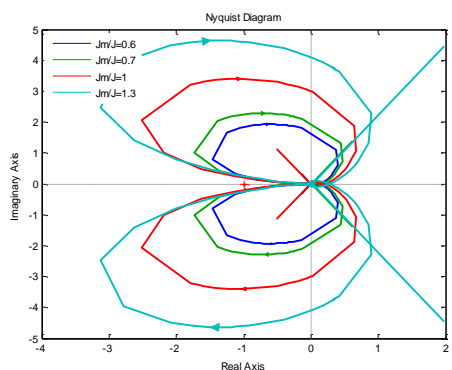
برای سیستم کارکرد از دور با رویتر اغتشاش ارتباطی در شکل ۵ تاثیر اغتشاش خارجی $D(s)$ بر روی سیگنال خروجی به صورت معادله (۵۲) می‌باشد. در موردی که اغتشاش خارجی یک تابع ضربه باشد یعنی $D(s)=1$ ، تاثیر اغتشاش روی پاسخ حالت ماندگار به صورت معادله (۵۳) به دست می‌آید.



شکل ۷- دیاگرام نایکوئیست برای تاخیرهای مختلف و $J_m/J=0.7$



شکل ۶- تاخیر متغیر با زمان



شکل ۸- دیاگرام نایکوئیست برای عدم قطعیت‌های مختلف و تاخیر ۳۰۰ میلی‌ثانیه

معادله (۳۲)، رویتگر اغتشاش ارتباطی مرتبه اول باید به گونه‌ای طراحی شود که معادله (۵۶) را برآورده کند.

$$g_{net} > 28 \quad (56)$$

همچنین با توجه به شرط معادله (۳۳)، رویتگر اغتشاش مرتبه دوم نیز باید به گونه‌ای طراحی شود که معادله (۵۷) را برآورده کند.

$$k_2 > 56 \quad (57)$$

از طرفی برای رویتگر اغتشاش مرتبه دوم با استفاده از معادله (۳۵) ضریب میرایی اغتشاش شبکه به صورت معادله (۵۸) است.

جدول ۱- مقادیر پارامترها

مقدار	مفهوم	پارامتر
۰/۰۰۵	اینرسی ربات (kgm^2)	J
۳۰۰	بهره تناسبی کنترلگر	Kp
۵۰	بهره مشتقی کنترلگر	Kv

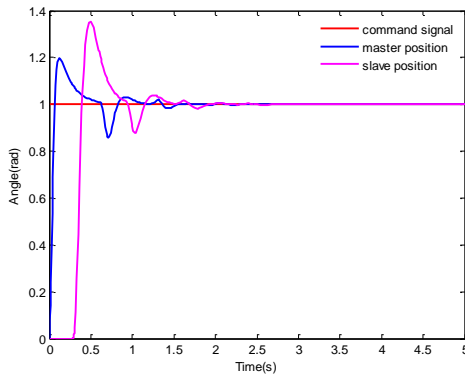
کارکرد از دور با ساختار پیشنهادی رویتگر اغتشاش ارتباطی و معیار پایداری نایکوئیست تحلیل می‌شود. شکل ۷ دیاگرام نایکوئیست سیستم با عدم قطعیت $J_m/J=0.7$ و چند تاخیر مختلف و شکل ۸ دیاگرام نایکوئیست سیستم با تاخیر زمانی ۳۰۰ میلی‌ثانیه و چند عدم قطعیت مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ از آنجا که در دیاگرام نایکوئیست، حول نقطه -۱ هیچ چرخشی وجود ندارد، بنابراین طبق معیار پایداری نایکوئیست، سیستم کارکرد از دور با رویتگر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی به ازای تاخیرها و عدم قطعیت‌های مختلف پایدار می‌ماند. مقادیر استفاده شده برای پارامترها در شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

۲-۵- اعمال شروط طراحی رویتگر اغتشاش

برای طراحی فرکانس فیلتر قطع پایین‌گذر در رویتگر اغتشاش ارتباطی مرتبه اول، با توجه به اینکه مقدار متوسط دو مقدار بیشینه و کمینه تاخیر متغیر با زمان برابر با ۳۰۰ میلی‌ثانیه است، پس می‌توان در به دست آوردن شرایط طراحی برای رویتگر اغتشاش، تقریب مناسبی برای اغتشاش شبکه با تاخیر ثابت ۳۰۰ میلی‌ثانیه به دست آورد. بنابراین با در نظر گرفتن تقریب مرتبه شش پد برای تاخیر ثابت ۳۰۰ میلی‌ثانیه، قطب‌های اغتشاش شبکه به صورت معادله (۵۵) حاصل شده‌اند.

$$P_{nd300} = -16 \pm 30j, -24 \pm 18j, -28 \pm 6j \quad (55)$$

در بین قطب‌های تقریب زده شده کوچکترین قسمت حقیقی متعلق به $-28 \pm 6j$ است. بنابراین طبق شرط طراحی در



شکل ۱۰- پاسخ موقعیت سیستم با رویتگر اغتشاش ارتباطی

$$\frac{J_m}{J} = 1 \text{ مرسوم مرتبه دوم با } J$$

و ردیابی سیگنال دستور توسط ربات فرمانبر به خوبی انجام می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که رویتگر مرتبه دوم از دقت بیشتری نسبت به رویتگر مرتبه اول برخوردار بوده و سیگنال‌های موقعیت دو ربات فرمانده و فرمانبر دقیقاً خود را به سیگنال دستور رسانده‌اند.

۵-۳- مقایسه رویتگر اغتشاش ارتباطی مرسوم و رویتگر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی برای مقایسه عملکرد رویتگر اغتشاش ارتباطی مرسوم مرتبه اول و رویتگر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی در این مقاله در حضور عدم قطعیت مدل و اغتشاش خارجی اعمال شده به ربات فرمانده ارائه شده است.

۵-۳-۱- بررسی تاثیر عدم قطعیت مدل

شکل ۱۱ پاسخ موقعیت فرمانده و فرمانبر برای سیستم کارکرد از دور با رویتگر اغتشاش ارتباطی مرسوم مرتبه اول با عدم قطعیت‌های مختلف را نشان می‌دهد. تاخیر موجود در کانال ارتباطی، تاخیر متغیر با زمان به صورت معادله (۵۴) می‌باشد. شکل ۱۲ نیز همین سیگنال‌ها را برای سیستم کارکرد از دور با رویتگر اغتشاش پیشنهادی نشان داده است. مشاهده می‌شود که در شکل ۱۱ سیستم با رویتگر اغتشاش ارتباطی مرسوم مرتبه اول با وجود عدم قطعیت سیستم عملکرد خوبی نداشته و بر اساس معادله (۴۳) خطای حالت ماندگار وجود دارد و ردیابی سیگنال دستور توسط سیگنال موقعیت ربات فرمانده و فرمانبر صورت نگرفته است.

$$\zeta_{nd} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cong 0.87 \quad (58)$$

بنابراین علاوه بر شرط اول طراحی در معادله (۵۷) رویتگر اغتشاش ارتباطی مرتبه دوم باید به نحوی طراحی شود که معادله (۵۹) را نیز برآورده کند.

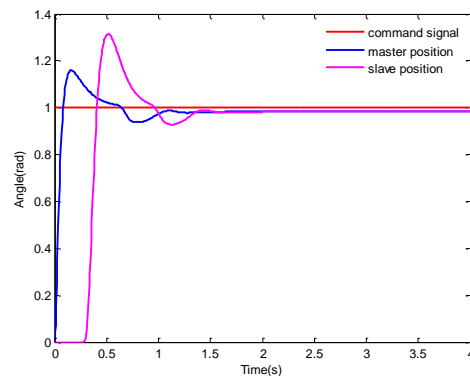
$$\zeta_{cdob} < 0.87 \quad (59)$$

بنابراین برای برآورده شدن شروط طراحی بیان شده در معادلات (۵۶)، (۵۷) و (۵۹) در این مقاله مقادیر فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر در رویتگر اغتشاش مرتبه اول، مقدار k_2 و ضریب میرایی در رویتگر اغتشاش مرتبه دوم به ترتیب در جدول ۲ بیان شده‌اند.

شکل‌های ۹ و ۱۰ پاسخ موقعیت دو ربات فرمانده و فرمانبر را به همراه سیگنال دستور به ترتیب برای رویتگر اغتشاش ارتباطی مرسوم مرتبه اول و دوم در حالتی که عدم قطعیت مدل وجود ندارد نشان می‌دهند. در این مقاله سیگنال دستور یک سیگنال پله واحد است که توسط کاربر به ربات فرمانده اعمال می‌شود. همانطور که از شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود سیستم کارکرد از دور با رویتگر اغتشاش ارتباطی مرسوم، هنگامیکه عدم قطعیت مدل وجود ندارد، پایدار مانده

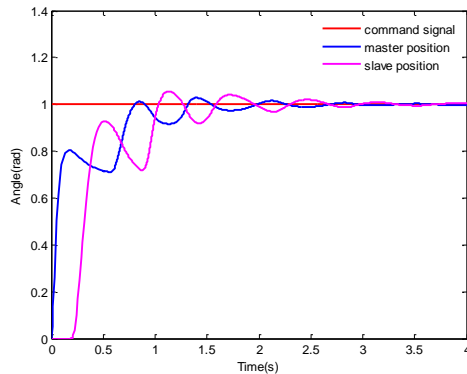
جدول ۲- مقادیر پارامترهای رویتگر اغتشاش ارتباطی

مقدار	پارامتر
۵۰۰	فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر (rad/s)
۱۰۰	k_2
۰/۵	ζ_{cdob}

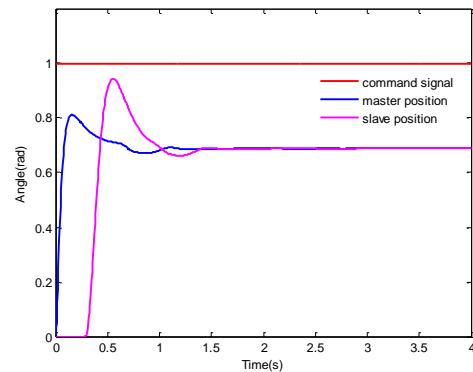


شکل ۹- پاسخ موقعیت سیستم با رویتگر اغتشاش ارتباطی

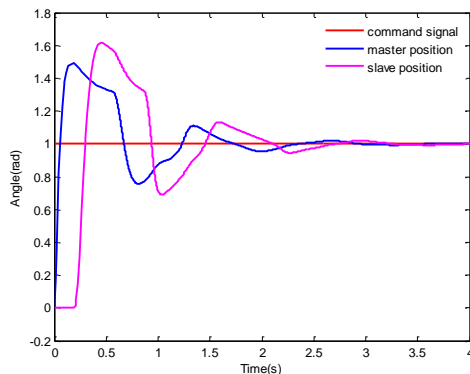
$$\frac{J_m}{J} = 1 \text{ مرسوم مرتبه اول با } J$$



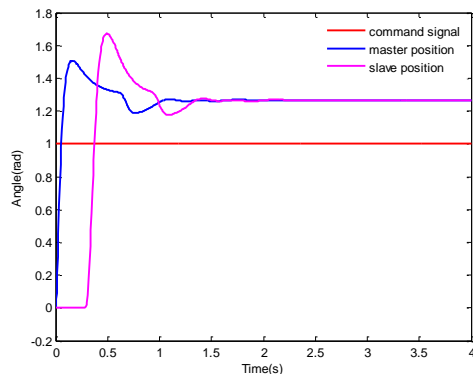
(الف)



(الف)



(ب)



(ب)

شکل ۱۲- پاسخ موقعیت سیستم با رویتر اغتشاش

ارتباطی پیشنهادی (الف) $\frac{J_m}{f} = 0.7$ ، (ب) $\frac{J_m}{f} = 1.3$

اغتشاش ضربه باعث ایجاد خطای بسیار زیادی در پاسخ موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر شده و سیستم به سمت ناپایداری رفته است.

شکل ۱۴ نتایج شبیه‌سازی برای سیستم کارکرد از دور با رویتر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی را در حضور اغتشاش ضربه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با استفاده از رویتر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی، حتی در حضور اغتشاش ضربه و عدم قطعیت مدل، خطای حالت ماندگار وجود نداشته و سیگنال‌های موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر سیگنال دستور را ردیابی کرده‌اند. این یکی از مزایای رویتر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی برای سیستم کارکرد از دور است. زیرا به طور مثال در سیستم جراحی از راه دور، ضربات ناخواسته از سمت جراح به ربات فرمانده، نباید ربات فرمانبر را از ردیابی موقعیت ربات فرمانده بازدارد.

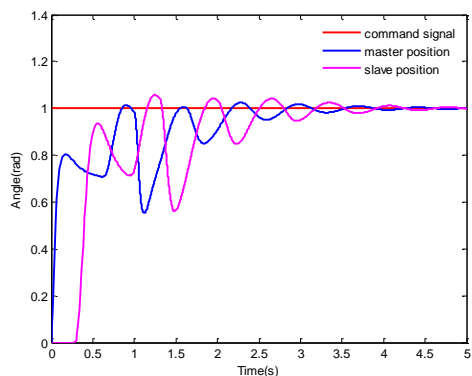
شکل ۱۱- پاسخ موقعیت سیستم با رویتر اغتشاش ارتباطی

مرتبه اول مرسوم (الف) $\frac{J_m}{f} = 0.7$ ، (ب) $\frac{J_m}{f} = 1.3$

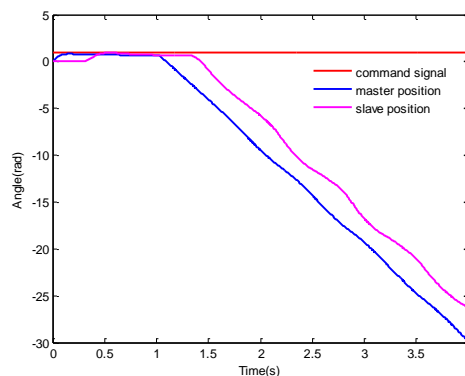
در صورتیکه در شکل ۱۲ با به‌کارگیری رویتر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی، حتی در صورت وجود عدم قطعیت مدل نیز ردیابی سیگنال دستور و موقعیت ربات فرمانده توسط ربات فرمانبر انجام شده و خطای حالت ماندگار به صفر رسیده است. به این دلیل، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از رویتر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی در سیستم کارکرد از دور عملکرد مطلوب را تامین می‌کند.

۵-۳-۲- بررسی تاثیر اغتشاش خارجی

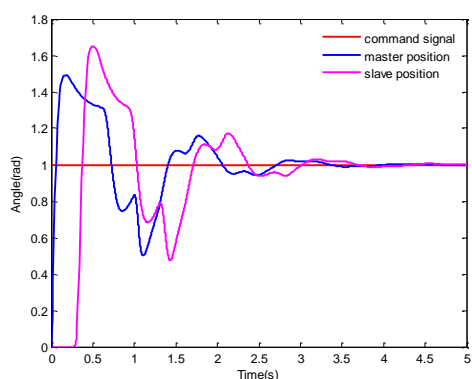
در این مقاله یک اغتشاش ضربه $(D(s)=1)$ در لحظه $t=1s$ به طور ناخواسته توسط کاربر به ربات فرمانده اعمال می‌شود. با این شرایط، نتایج شبیه‌سازی برای سیستم کارکرد از دور با رویتر اغتشاش ارتباطی مرسوم مرتبه اول در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در شکل ۱۳



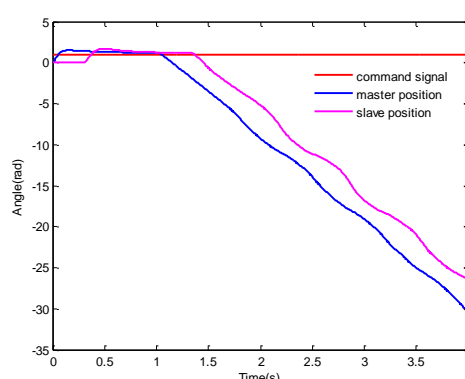
(الف)



(الف)



(ب)



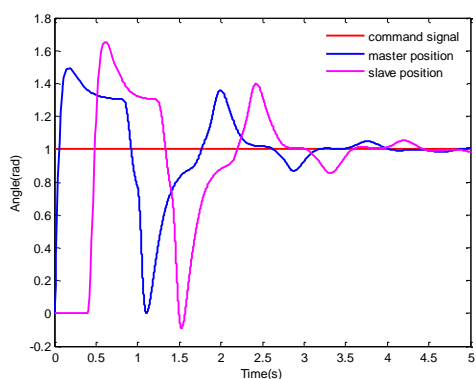
(ب)

شکل ۱۴- تاثیر اغتشاش ضربه بر پاسخ موقعیت سیستم با رویتگر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی (الف) $\frac{J_m}{J} = 0.7$ ، (ب)

$$\frac{J_m}{J} = 1.3$$

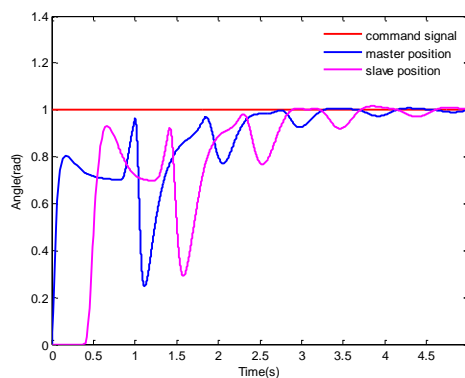
شکل ۱۳- تاثیر اغتشاش ضربه بر پاسخ موقعیت سیستم با رویتگر اغتشاش ارتباطی مرتبه اول مرسوم (الف) $\frac{J_m}{J} = 0.7$ ، (ب)

$$\frac{J_m}{J} = 1.3$$



شکل ۱۶- تاثیر افزایش دامنه اغتشاش ضربه بر پاسخ موقعیت سیستم با رویتگر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی

$$\frac{J_m}{J} = 1.3$$



شکل ۱۵- تاثیر افزایش دامنه اغتشاش ضربه بر پاسخ موقعیت سیستم با رویتگر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی

$$\frac{J_m}{J} = 0.7$$

در حضور عدم قطعیت مدل نیز عملکرد خوبی را تامین می‌کند. همچنین مشخصه حذف اغتشاش خارجی نیز مطالعه شده و مشاهده شد که ساختار پیشنهادی اثر اغتشاش ضربه وارد شده به ربات فرمانده را حذف کرده و خطای حالت ماندگار به صفر می‌رسد. نتایج شبیه‌سازی برای نشان دادن سودمندی رویتر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی در مقابل رویتر اغتشاش ارتباطی مرسوم نیز ارائه شد.

مراجع

- [1] Dede MIC, Tosunoglu S, Repperger D (2005) A study on multiple degree-of-freedom force-reflecting teleoperation with constant and variable time delays. ASME Southeast Reg. Xi Tec 4: 1-3.
- [2] Anderson RJ, Spong MW (1989) Bilateral control of teleoperators with time delay. Autom Control IEEE Trans (34): 494-501.
- [3] Niemeyer G, and Slotine J (1991) Stable adaptive teleoperation. Ocean Eng IEEE (16): 152-162.
- [4] MoafiMadani SM, Sabouri B, Fallahi B, and Taghirad HD (2011) Implementation of wave-based teleoperation system by improved trajectory tracking method. Control. Instrumentation and Automation (ICCIA), 2nd International Conference IEEE: 999-1005.
- [5] Xu S, Lam J, Zou Y (2006) New results on delay-dependent robust H_∞ control for systems with time-varying delays. Autom (42): 343-348.
- [6] Sirouspour S, Shahdi A (2006) Model predictive control for transparent teleoperation under communication time delay. Robot IEEE Trans (22): 1131-1145.
- [7] Smith OJ (1959) A controller to overcome dead time. ISA (6): 28-33.
- [8] Natori K, Tsuji T, Ohnishi K (2006) Time delay compensation by communication disturbance observer in bilateral teleoperation systems. Advanced Motion Control. 9th IEEE International Workshop IEEE: 218-223.
- [9] Natori K, Ohnishi K (2008) A design method of communication disturbance observer for time-delay compensation, taking the dynamic property of network disturbance into account. Ind Electron. IEEE Trans (55): 2152-2168.
- [10] Natori K, Tsuji T, Ohnishi K, Hace A, Jezernik K (2010) Time-delay compensation by communication disturbance observer for bilateral teleoperation under time-varying delay. Ind Electron. IEEE Trans (57): 1050-1062.
- [11] Rahman AA, Ohnishi K (2010) Robust time delayed control system based on communication disturbance observer with inner loop input. IECON

شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نیز پاسخ موقعیت دو ربات فرمانده و فرمانبر را هنگامی که دامنه اغتشاش ضربه ۲ برابر می‌شود ($D(s)=2$) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در هر دو حالت عدم قطعیت، افزایش دامنه اغتشاش بر مشخصه حالت ماندگار تاثیری نداشته و خطای حالت ماندگار به صفر رسیده است. البته در حالت گذرا در لحظه اعمال اغتشاش پاسخ موقعیت ربات‌های فرمانده و فرمانبر از سیگنال دستور فاصله بیشتری گرفته‌اند ولی در نهایت خود را به سیگنال دستور رسانده‌اند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو ساختار برای رویتر اغتشاش ارتباطی در سیستم کارکرد از دور با تاخیر متغیر با زمان مطالعه شد. دو شرط طراحی معرفی شده در [۹] که بر اساس قطب‌های اغتشاش شبکه و قطب‌های رویتر اغتشاش ارتباطی هستند بررسی شده و بر اساس آن فرکانس مناسبی برای رویتر اغتشاش ارتباطی مرسوم مرتبه اول و ضریب میرایی مناسب برای رویتر اغتشاش ارتباطی مرتبه دوم طراحی شد. همچنین از آنجا که بر اساس نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده، خطای مدل‌سازی بین رویتر و سیستم کنترلی در ساختار مرسوم رویتر اغتشاش منجر به تخمین نادرست اغتشاش شبکه و در نتیجه خطای حالت ماندگار می‌شود، از اینرو مهمترین دستاورد این مقاله ارائه ساختار دیگری برای رویتر اغتشاش ارتباطی در سیستم کارکرد از دور برای دستیابی به پایداری مقاوم سیستم، با توجه به ساختار معرفی شده در [۱۱] برای رویتر اغتشاش در یک سیستم تاخیردار، می‌باشد. اعمال ساختار معرفی شده در [۱۱] به سیستم کارکرد از دور و استفاده مستقیم از گشتاور ربات فرمانبر و گشتاور ربات فرمانده به عنوان ورودی‌های رویتر اغتشاش ارتباطی منجر به پایداری و عملکرد مناسب سیستم نمی‌شود. از اینرو، در این مقاله ابتدا گشتاور تاخیر یافته ربات فرمانبر از طریق سیگنال موقعیت تاخیر یافته آن محاسبه شده و سپس از این گشتاور تاخیر یافته ربات فرمانبر به جای موقعیت تاخیر یافته آن به عنوان ورودی رویتر اغتشاش ارتباطی استفاده می‌شود. بنابراین بر خلاف رویتر اغتشاش ارتباطی مرسوم، عدم قطعیت بین ربات و مدل در تخمین اغتشاش شبکه وارد نشده و رویتر اغتشاش ارتباطی پیشنهادی حتی

delay system with communication disturbance observer. Mechatronics (ICM) IEEE International Conference: 880–885.

2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society: 1621–1626.

[12] Natori K, Ohnishi K (2013) Disturbance-attenuation characteristic of a structure of time-