

کنترل رویداد-تحریک حرکت‌های گروهی در سیستم‌های چندعامله در حضور حملات

سایبری

ندا امیریان^۱، سعید شمقدری^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد کنترل، دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، n_amirian@elec.iust.ac.ir

^۲استادیار، دانشکده برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، shamaghdari@iust.ac.ir

چکیده- ما در این مقاله یک کنترل‌کننده رویداد-تحریک برای یک سیستم چندعامله درجه دو با هدف رسیدن به حرکت گروهی مطلوب در حضور حملات سایبری به دینامیک عامل‌ها پیشنهاد کرده‌ایم. در روش ما از یک کنترل سه‌حالتی رویداد-تحریک و توزیع‌شده به جهت افزایش مقاوم بودن شبکه ارتباطی دینامیک و تشکیل یک حرکت گروهی استفاده شده است که هر حالت دارای شرط تحریک جداگانه‌ای می‌باشد. قانون بروزرسانی رویداد-تحریک می‌تواند اثر عامل‌های مخرب را با استفاده از الگوریتم $W-MSR$ از بین ببرد و در عین حال از تبادل داده‌های اضافی بین عامل‌ها جلوگیری کند تا در مصرف انرژی صرفه‌جویی شود. همگرایی سرعت و جهت حرکت عامل‌ها با استفاده از این ساختار تضمین می‌شود و پدیده نقطه تجمع در آن رخ نمی‌دهد. در مکانیزم رویداد-تحریک هر عامل حالت خودش را با استفاده از اطلاعات همسایه‌هایش بروز می‌کند ولی تنها زمانی که شرط تحریک برقرار شود، اطلاعات خود را به همسایه‌هایش ارسال می‌کند. در غیر این صورت همسایه‌ها از اطلاعات قبلی خود که آخرین بار از این عامل دریافت کرده‌اند، استفاده می‌کنند. در آخر، با شبیه‌سازی یک مثال صحت و کارایی روش پیشنهادی سنجیده می‌شود. کلید واژه- حرکت گروهی، حملات سایبری، سیستم چندعامله، کنترل رویداد-تحریک.

استفاده از مکانیزم‌های رویداد-تحریک ویژگی‌های منحصر به فردی مانند کاهش پهنای باند ارتباطی مورد نیاز، کاهش محاسبات اضافی و کاهش مصرف انرژی به سیستم می‌دهد. در [۱] توافق رویداد-محور، یکی از سرفصل‌های اصلی می‌باشد ولی به صورت جامع در [۳] تمام مطالعات اخیر در حوزه توافق رویداد-تحریک مرور می‌شود. یکی دیگر از مشخصه‌های رفتاری سیستم‌های چندعامله حرکت گروهی است. Reynolds سه قانون برای ایجاد یک حرکت گروهی معرفی کرد که با رعایت این سه قانون یک حرکت گروهی تشکیل می‌شود [۴]. مسئله امنیت سایبری برای این نوع از سیستم‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. معمولاً الگوریتم‌های کنترلی سیستم‌های چندعامله به صورت توزیع شده و بدون داشتن یک مشاهده‌گر مرکزی طراحی می‌شوند، در نتیجه شرایط نامناسب پیش‌بینی نشده مانند عدم قطعیت‌ها یا حمله به شبکه می‌تواند به آسانی باعث ناپایداری سیستم شود. در یک سیستم چندعامله دو نوع حمله ممکن است رخ دهد، حمله به دینامیک عامل‌ها و حمله به لینک‌های ارتباطی [۵]. در حمله به دینامیک عامل برای کاهش اثر عامل‌های تحت حمله از الگوریتم $W-MSR$ (Weighted- Mean Subsequence Reduced) استفاده می‌شود که بسیار موثر و مفید است. منبع [۶] برای دستیابی به توافق تاب‌آور برای سیستم درجه

۱- معرفی

در دهه گذشته، کنترل سیستم‌های چندعامله با استفاده از رویکرد رویداد-تحریک^۱، بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. مسئله توافق^۲ مسئله‌ای پایه‌ای برای آرایش^۳، حرکت‌های گروهی^۴، همگام‌سازی و ... محسوب می‌شود و کاربردهای زیادی دارد. به همین دلیل تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته‌است. در توافق هدف این است که همه‌ی عامل‌ها به یک حالت مشترک دست پیدا کنند. منبع [۱] به حل انواع مختلف مسئله توافق در سیستم‌های چندعامله به صورت مفصل پرداخته است. در [۲] به بررسی الگوریتم‌های مختلف توافق در شرایط مختلفی همچون توپولوژی ارتباطی جهت‌دار، توپولوژی ارتباطی سوئیچینگ و تاخیر زمانی پرداخته و نحوه عملکرد و شرایط همگرایی هر یک بررسی شده‌است.

^۱ Event-triggered

^۲ Consensus

^۳ Formation

^۴ Flocking

عامل در فضای اقلیدسی با $x_i \in \mathbb{R}^d$ مشخص می‌شود. برای نشان دادن کیفیت لینک ارتباطی بین هر دو گره (i, j) از تابع A_{ij} استفاده می‌کنیم:

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \|x_i - x_j\| < \rho \\ 0 & \|x_i - x_j\| \geq R \\ e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

که در این رابطه $R > \rho$ و $\rho > 0$ است. ماتریس لاپلاسیان نیز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$[L]_{ij} = \begin{cases} -A_{ij} & i \neq j \\ \sum_j A_{ij} & i = j \end{cases}$$

تعریف ۱ (r-reachable). برای گراف G ، به یک زیرمجموعه غیرتهی از گره‌ها $B \subseteq v$ r-reachable گفته می‌شود اگر $\exists v_i \in B$ داشته باشیم: $|N_i \setminus B| \geq r$ و $r \in \mathbb{N}$

تعریف ۲ (r-robust). به گراف G ، r-robust گفته می‌شود اگر برای هر دو زیرمجموعه مجزا $B_1, B_2 \subset v$ حداقل یکی از آن‌ها r-reachable باشند.

تعریف ۳ (توافق تاب‌آور). یک سیستم چندعامله به توافق تاب‌آور می‌رسد اگر تمام عامل‌های سالم آن در حضور حداکثر F عامل مورد حمله قرار گرفته، به توافق برسند.

لم ۱. اگر λ_2 دومین کوچکترین مقدار ویژه برای گراف G باشد، $\left\lfloor \frac{\lambda_2}{2} \right\rfloor$ یک حد پایین برای r محسوب می‌شود، یعنی $r \geq \left\lfloor \frac{\lambda_2}{2} \right\rfloor$. مدل دینامیکی زیر را برای هر عامل در نظر می‌گیریم:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ \dot{v}_i = u_i \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه (۲) v_i سرعت عامل نام در فضای اقلیدسی \mathbb{R}^d و u_i سیگنال کنترلی عامل نام می‌باشد. همانطور که در بخش قبل بیان شد، برای رسیدن به حرکت گروهی، از الگوریتم توافق به نحوی استفاده خواهیم کرد که یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های حرکت گروهی یعنی هم‌سرعت شدن و هم‌جهت شدن عامل‌ها حاصل شود. قانون روزرسانی برای رسیدن به توافق در سرعت را به صورت رابطه (۳) تعریف می‌کنیم:

$$v_i(k+1) = \frac{1}{1+n_i} (v_i(k) + \sum_{N_i} \hat{v}_j(k)) \quad (3)$$

توالی زمانی رویدادها در عامل نام به صورت k_0^i, k_1^i, \dots مشخص می‌شود و $k \in [k_i^i, k_{i+1}^i)$ و $\hat{v}_i(k) = v_i(k_i^i)$ می‌باشد که k_i^i مربوط به زمان آخرین رویداد است. در این مقاله از برای جلوگیری از پدیده نقطه تجمع^۴ از یکی از انواع تابع تحریک‌های بدون نقطه تجمع

دو در حضور عامل‌های بدرفتار از این الگوریتم بهره برده‌است. در [۷] با استفاده از این الگوریتم موفق شدند تا یک کنترل‌کننده تطبیقی ایمن برای سیستم چندفضایی که دارای عدم قطعیت در پارامترهای مدل می‌باشند طراحی کنند. در [۸] هدف اصلی مقاله رسیدن به حرکت گروهی تاب‌آور برای تیمی از ربات‌های متحرک در حضور حملات سایبری است. ولی با توجه به وجود تعداد زیادی از عامل‌ها و همچنین نیاز به سطح ارتباطاتی بالا در بین آن‌ها حجم اطلاعات زیادی بین عامل‌ها رد و بدل می‌شود. این ترافیک اطلاعاتی می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد سیستم شود و همچنین مصرف انرژی را در هر عامل که معمولاً با باتری تغذیه می‌شوند، بسیار افزایش دهد. از سوی دیگر توزیع شده بودن روش پیشنهادی یک فاکتور بسیار مهم است که این ویژگی در آن وجود ندارد.

هدف ما در این مقاله رسیدن به حرکت گروهی تاب‌آور در یک سیستم چندعامله با طراحی مکانیزمی برای سنکرون‌سازی سرعت-ها و تنظیم فاصله‌های نسبی در بین عامل‌ها و در عین حال با صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کاهش باند ارتباطی بین عامل‌ها است. استراتژی پیشنهادی ما بر پایه الگوریتم توافق توزیع شده بنا شده‌است. در این مقاله فرض شده است که دینامیک عامل‌ها مورد حمله قرار می‌گیرند. در این شرایط عامل تحت حمله، به یک عامل مخرب تبدیل می‌شود و اطلاعات غلطی از خود را با همسایه‌هایش به اشتراک می‌گذارد. این حملات با استفاده از الگوریتم W-MSR بی‌اثر می‌شوند. همچنین لینک‌های ارتباطی بین عامل‌ها به صورت متغیر با زمان در نظر گرفته شده‌است. برای تضمین شرط رسیدن به توافق تاب‌آور یک کنترل‌کننده سه‌حالته رویداد-تحریک پیشنهاد می‌شود.

در ادامه این مقاله در فصل دوم، مقدماتی از تئوری گراف، مدل سیستم و تعاریف پایه‌ای بیان می‌شود. در فصل سوم سیستم کنترل پیشنهادی ارائه شده و در فصل چهارم با شبیه‌سازی یک مثال عمکرد کنترل‌کننده پیشنهادی سنجیده می‌شود. در بخش آخر نتایج اصلی مقاله بیان خواهد شد.

۲- مقدمات

توپولوژی ارتباطی بین عامل‌ها با استفاده از گراف بدون جهت $G = (v, \mathcal{E})$ مدل می‌شود. که مجموعه گره‌ها $v = \{1, 2, \dots, n\}$ نشان‌دهنده عامل‌ها و مجموعه یال‌ها $\mathcal{E} \subseteq v \times v$ نشان‌دهنده لینک‌های ارتباطی بین عامل‌ها است. N_i مجموعه‌ی همسایه‌های عامل نام است که به صورت $N_i = \{j | (j, i) \in \mathcal{E}\}$ تعریف می‌شود. همینطور $n_i = |N_i|$ درجه عامل نام نامیده می‌شود. موقعیت هر

^۴ Resilient Consensus

^۶ Zeno behavior

استفاده شده است. در گام بعدی باید به حل مسئله توافق تاب‌آور پردازیم. فرض می‌کنیم حد بالای تعداد عامل‌های مخرب در همسایگی هر عامل برابر F باشد. در این صورت مدل سیستم F -local نامیده می‌شود. برای این که توافق تاب‌آور در سیستم چندعامله و در حضور حداکثر F عامل مخرب برقرار شود از الگوریتم W -MSR که شامل ۳ گام است، استفاده می‌کنیم. در گام اول عامل نام اطلاعات دریافت شده از همسایه‌هایش $v_i(k)$ را از کوچک به بزرگ در یک لیست مرتب می‌کند. در گام دوم مقدار داده‌های لیست شده را با داده خودش $v_i(k)$ مقایسه می‌کند و F تا بزرگترین مقادیر را نسبت به $v_i(k)$ از لیست حذف می‌کند اگر تعداد این داده‌ها کمتر از F بود همه آن‌ها را حذف می‌کند. سپس همین پروسه را برای حذف F داده کوچکتر نیز اجرا می‌کند. در گام سوم اطلاعات باقی مانده در لیست را در مجموعه $R_i(k)$ می‌ریزد و پروتکل توافق را با این داده‌های باقی مانده اجرا می‌کند. پس قانون روزرسانی (۳) به شکل زیر تغییر می‌کند:

به شکل زیر تغییر می‌کند:

$$v_i(k+1) = \frac{1}{1+|R_i(k)|} (v_i(k) + \sum_{R_i(k)} \hat{v}_j(k)) \quad (4)$$

برای این که همگرایی این الگوریتم توافق تاب‌آور تضمین شود، باید گراف مربوط به توپولوژی ارتباطی G ، حداقل $(2F+1)$ -robust باشد، یعنی $r \geq 2F+1$. در توپولوژی ارتباطی دینامیک ممکن است در برخی زمان‌ها مقدار r کاهش یابد و الگوریتم W -MSR کارایی خود را از دست بدهد. به همین علت به کنترل‌کننده-ای نیاز داریم تا در طول زمان اجرا r مربوط به توپولوژی را کنترل کند و اجازه ندهد از $2F+1$ کمتر بشود. در بخش بعد سیستم کنترلی پیشنهادی ارائه خواهد شد.

$$\frac{\partial \lambda_2(\bar{L})}{\partial x_{i,\alpha}} = \text{trace} \left\{ \left[\frac{\partial \bar{L}}{\partial x_{i,\alpha}} \right]^T \cdot \left[\frac{\partial L(x_i, x_j)}{\partial x_{i,\alpha}} \right] \right\} \quad (6)$$

در حالت اول تابع تحریک را به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

$$E_{i,1}(k+1) = x_i(k+1) - \hat{x}_i(k) \quad (7)$$

$$f_{i,1}(k+1) = \|E_{i,1}(k+1)\| - (a_1 + b_1 e^{-c_1(k+1)}) \quad (8)$$

در حالت دوم $\lambda_2 > 4F$ است و تضمین می‌شود که سیستم $(2F+1)$ -robust است و می‌تواند به توافق تاب‌آور برسد. اما هنوز به وضعیت بحرانی حالت اول نزدیک است. پس در این حالت قانون کنترلی را در نظر می‌گیریم که شامل اهداف اصلی سیستم باشد و باز هم ارتباط بین عامل‌ها را بیشتر کند.

$$u_i = \varepsilon \hat{v}_i \lambda_2 + v_i(k+1) \quad (9)$$

ε ضریبی است که $\frac{d\lambda_2}{dt}$ را مثبت نگه می‌دارد. در این حالت تابع تحریک را به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

$$E_{i,2}(k+1) = [x_i(k+1), v_i(k+1)]^T - [\hat{x}_i(k), \hat{v}_i(k)]^T \quad (10)$$

$$f_{i,2}(k+1) = \|E_{i,2}(k+1)\| - (a_2 + b_2 e^{-c_2(k+1)}) \quad (11)$$

وقتی سیستم به اندازه کافی از ناحیه بحرانی دور شد و در شرایط $\lambda_2 > \eta_1(4F)$, $\eta_1 > 1$ صدق کرد، سیگنال کنترلی زیر به سیستم اعمال می‌شود:

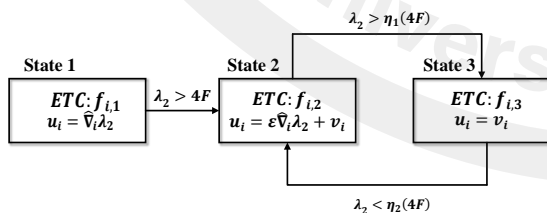
$$u_i = v_i(k+1) \quad (12)$$

در این حالت تابع تحریک را به شکل زیر تعریف می‌کنیم:

$$E_{i,3}(k+1) = v_i(k+1) - \hat{v}_i(k) \quad (13)$$

$$f_{i,3}(k+1) = \|E_{i,3}(k+1)\| - (a_3 + b_3 e^{-c_3(k+1)}) \quad (14)$$

اگر در حالت سه مقدار λ_2 کاهش یافت و به حد $\lambda_2 < \eta_2(4F)$, $\eta_2 > 1$ رسید، سیستم دوباره وارد حالت دوم می‌شود تا ضمن تلاش برای رسیدن به هدف کلی خود، مقدار λ_2 را افزایش دهد و دوباره وارد حالت سوم شود.



شکل ۱-۳ ساختار کنترل‌کننده رویداد-تحریک سه‌حالتی

۲-۳ محاسبه توزیع شده و رویداد-تحریک \hat{v}_2

برای محاسبه بردارهای ویژه ماتریس لاپلاسی از الگوریتم توزیع شده در [۹] با رویکرد رویداد-تحریک استفاده می‌کنیم. برای این منظور ماتریس شامل بردارهای ویژه را W می‌نامیم:

$$v_i(k+1) = \frac{1}{1+|R_i(k)|} (v_i(k) + \sum_{R_i(k)} \hat{v}_j(k)) \quad (4)$$

برای این که همگرایی این الگوریتم توافق تاب‌آور تضمین شود، باید گراف مربوط به توپولوژی ارتباطی G ، حداقل $(2F+1)$ -robust باشد، یعنی $r \geq 2F+1$. در توپولوژی ارتباطی دینامیک ممکن است در برخی زمان‌ها مقدار r کاهش یابد و الگوریتم W -MSR کارایی خود را از دست بدهد. به همین علت به کنترل‌کننده-ای نیاز داریم تا در طول زمان اجرا r مربوط به توپولوژی را کنترل کند و اجازه ندهد از $2F+1$ کمتر بشود. در بخش بعد سیستم کنترلی پیشنهادی ارائه خواهد شد.

۳- کنترل رویداد-تحریک سه‌حالتی

در این بخش کنترل‌کننده‌ای طراحی می‌کنیم که بتواند مقدار r سیستم را در محدوده مجاز نگه دارد و هدف اصلی مقاله را برآورده کند. برای سادگی کار از یک حد پایین برای r استفاده می‌کنیم. با استفاده از لم ۱، با کنترل مقدار λ_2 و نگه داری آن در سطح $\lambda_2 > 4F$ به هدف مورد نظر خواهیم رسید [۸].

۱-۳ طراحی کنترل‌کننده

در شکل ۱-۳ طرح کلی از کنترل‌کننده رویداد-تحریک مورد نظر را می‌بینیم. در این کنترل‌کننده سه حالتی زمانی که مقدار λ_2 در بازه مجاز نیست و تضمینی برای رسیدن آن به توافق تاب‌آور وجود ندارد در حالت اول قرار می‌گیریم و عامل‌ها قانون کنترلی (۵) را به سیستم اعمال می‌کنند تا λ_2 را افزایش دهند.

$$u_i = \hat{v}_i \lambda_2 \quad (5)$$

توپولوژی ارتباطی دینامیک و کنترل کننده سه حالتی شکل (۱)، زمانی که سیستم در حالت یک باشد، $\hat{V}_i \lambda_2$ به $\nabla_i \lambda_2$ همگرا می شود و داریم:

$$\|\hat{\nabla}_i \lambda_2 - \nabla_i \lambda_2\| \leq \sqrt{\sum_{d=\alpha, \beta, \dots} \sum_{j=1}^n C_{j,d}^2 e^{\left(\frac{-2\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)}} \quad (۱۵)$$

اثبات: در ابتدا $\hat{g}_{i,\alpha}$ و $g_{i,\alpha}$ را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$g_{i,\alpha} = \text{trac} \left(\left(\frac{v_2 \cdot v_2^T}{v_2^T \cdot v_2} \right)^T, \frac{\partial L}{\partial x_{i,\alpha}} \right) \quad (۱۶)$$

$$\hat{g}_{i,\alpha} = \text{trac} \left(\left(\frac{\hat{v}_2 \cdot \hat{v}_2^T}{\hat{v}_2^T \cdot \hat{v}_2} \right)^T, \frac{\partial \hat{L}}{\partial x_{i,\alpha}} \right) \quad (۱۷)$$

$$v_2 = [v_{12}, v_{22}, \dots, v_{n2}]^T, v_{i2} \in [0, 1] \text{ for } i = 1, \dots, n \quad (۱۸)$$

$$\hat{v}_2 = [\hat{v}_{12}, \hat{v}_{22}, \dots, \hat{v}_{n2}]^T, \hat{v}_{i2} \in [0, 1] \text{ for } i = 1 \dots n \quad (۱۹)$$

در محاسبه المان های $\frac{\partial L}{\partial x_{i,\alpha}}$ فقط به المان هایی از ماتریس لاپلاسین نیاز داریم که دارای متغیر $x_{i,\alpha}$ باشند، این المان ها نیز فقط مربوط به عامل های همسایه ی عامل نام در سطر و ستون نام و المان های روی قطر اصلی هستند. همچنین حالتی را در نظر می - گیریم که $\rho \leq \|x_i - x_j\| < R$ و $\frac{\partial A_{ij}}{\partial x_{i,\alpha}}$ مخالف صفر و نمایی باشد.

$$g_{i,\alpha} = v_{12}^2 \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} + v_{22}^2 \frac{\partial A_{2i}}{\partial x_{i,\alpha}} + \dots + v_{i2}^2 \sum_{j=1}^n \frac{\partial A_{ij}}{\partial x_{i,\alpha}} + \dots - 2 \cdot v_{12} \cdot v_{i2} \cdot \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} - 2 \cdot v_{22} \cdot v_{i2} \frac{\partial A_{2i}}{\partial x_{i,\alpha}} \dots - 2 \cdot v_{n2} \cdot v_{i2} \cdot \frac{\partial A_{in}}{\partial x_{i,\alpha}} \quad (۲۰)$$

$\hat{g}_{i,\alpha}$ را نیز مانند رابطه (۲۰) نوشته و $\|\hat{g}_{i,\alpha} - g_{i,\alpha}\|$ را تشکیل می دهیم.

$$\|\hat{g}_{i,\alpha} - g_{i,\alpha}\| = \left\| \left(\hat{v}_{12}^2 \frac{\partial \hat{A}_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{12}^2 \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right) + \left(\hat{v}_{22}^2 \frac{\partial \hat{A}_{2i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{22}^2 \frac{\partial A_{2i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right) + \dots + \left(\hat{v}_{i2}^2 \sum_{j=1}^n \frac{\partial \hat{A}_{ij}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{i2}^2 \sum_{j=1}^n \frac{\partial A_{ij}}{\partial x_{i,\alpha}} \right) + \dots + \left(\hat{v}_{n2}^2 \frac{\partial \hat{A}_{in}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{n2}^2 \frac{\partial A_{in}}{\partial x_{i,\alpha}} \right) - 2 \left(\hat{v}_{12} \cdot \hat{v}_{i2} \cdot \frac{\partial \hat{A}_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{12} \cdot v_{i2} \cdot \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right) \dots - 2 \left(\hat{v}_{n2} \cdot \hat{v}_{i2} \cdot \frac{\partial \hat{A}_{in}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{n2} \cdot v_{i2} \cdot \frac{\partial A_{in}}{\partial x_{i,\alpha}} \right) \right\| \quad (۲۱)$$

$$\|\hat{g}_{i,\alpha} - g_{i,\alpha}\| \leq \left| \hat{v}_{12}^2 \frac{\partial \hat{A}_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{12}^2 \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| + \left| \hat{v}_{22}^2 \frac{\partial \hat{A}_{2i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{22}^2 \frac{\partial A_{2i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| + \dots + \left| \hat{v}_{i2}^2 \sum_{j=1}^n \frac{\partial \hat{A}_{ij}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{i2}^2 \sum_{j=1}^n \frac{\partial A_{ij}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| + \dots + \left| \hat{v}_{n2}^2 \frac{\partial \hat{A}_{in}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{n2}^2 \frac{\partial A_{in}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| + 2 \cdot \left| \hat{v}_{12} \cdot \hat{v}_{i2} \cdot \frac{\partial \hat{A}_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{12} \cdot v_{i2} \cdot \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| + \dots + 2 \cdot \left| \hat{v}_{n2} \cdot \hat{v}_{i2} \cdot \frac{\partial \hat{A}_{in}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{n2} \cdot v_{i2} \cdot \frac{\partial A_{in}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| \quad (۲۲)$$

$\frac{\partial \hat{A}_{ij}}{\partial x_{i,\alpha}}$ و $\frac{\partial A_{ij}}{\partial x_{i,\alpha}}$ به شکل زیر می باشد:

$$\frac{\partial A_{ij}}{\partial x_{i,\alpha}} = K \cdot \frac{x_{j,\alpha} - x_{i,\alpha}}{\|x_i - x_j\|} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)}, K = \frac{\gamma}{R - \rho}$$

$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix}_{n \times n}$, $w_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}]$
فرض می کنیم که عامل نام سطرهای $w_j = w_j(k_i^j)$, $j \in N_i$ را از همسایه هاش دریافت می کند و w_i خود را به وسیله الگوریتم زیر بروز می نماید و سطرهای مربوط به عامل های $j \notin N_i$ را صفر قرار می دهد در نتیجه ماتریس W به \hat{W} تبدیل می شود.

- در $s = 0$, $w_i^{(0)}$ را با یک مقدار تصادفی آغاز می کنیم،
 - $e_i^{(s+1)} = \hat{L}_i^{(k)} \hat{W}^{(s)}$ سطر نام ماتریس لاپلاسین و $e^{(s+1)}$ بروزسانی شده ی سطر $w_i^{(s)}$ است،
 - محاسبه مقدار میانگین $\bar{e}_2^{(s+1)}$
 - $e_{i2}^{(s+1)} = e_{i2}^{(s+1)} - \bar{e}_2^{(s+1)}$
 - محاسبه $w_i^{(s+1)}$ با ارتونرمالیزه کردن $e_i^{(s+1)}$
 - تکرار حلقه تا رسیدن به همگرایی در w_i .
- برای محاسبه مقدار میانگین $\bar{e}_2^{(s+1)}$ از الگوریتم زیر بهره می - گیریم:

- در $r = 0$, $\bar{e}_i^{(0)} = e_{i2}^{(s+1)}$ شروع می کنیم،
- $\hat{e}_j^{(k)} = \bar{e}_i^{(r+1)} = \bar{e}_i^{(r)} + \sum_{j \in N_i} M_{ij}^{(k)} \hat{e}_j^{(k)}$ که $\bar{e}_j(k_i^j)$, $k \in [k_i^j, k_{i+1}^j]$
- تکرار حلقه تا رسیدن به همگرایی.

همچنین برای ارتونرمالیزه کردن توزیع شده، از تجزیه ماتریس \hat{W} به شکل $E = \hat{W}H$ استفاده می شود. سطرهای ماتریس E بردارهای سطری غیر-یکماتعمد e_i هستند و H یک ماتریس بالا مثلثی است که باید محاسبه شود.

$$S = E^T E = H^T H \rightarrow H = \text{chol}(S)$$

الگوریتم محاسبه ماتریس S به این شکل می باشد:

- در $s = 0$, $S_i^{(0)} = e_i^T e_i$ شروع می کنیم،
- $S_j^{(k)} = S_i^{(r+1)} = S_i^{(r)} + \sum_{j \in N_i} M_{ij}^{(k)} S_j^{(k)}$ که $S_j(k_i^j)$, $k \in [k_i^j, k_{i+1}^j]$
- تکرار حلقه تا رسیدن به همگرایی،
- محاسبه ی $S = n \cdot S_i$.

۳-۳- همگرایی

در این بخش ابتدا نشان می دهیم که استفاده از $\hat{\nabla}_i \lambda_2$ به جای $\nabla_i \lambda_2$ ما را به هدف خود که افزایش λ_2 است می رساند و $\hat{\nabla}_i \lambda_2$ به $\nabla_i \lambda_2$ همگرا می شود. سپس نشان می دهیم وقتی سیستم در حالت دو است، با تنظیم پارامترهای کنترل کننده (۹)، دیگر به حالت یک باز نخواهد گشت.

تئوری ۱: برای یک سیستم چندعامله با دینامیک درجه دو و

است که عامل‌ها به سیستم جلوگیری از برخورد مجهز هستند و $\|x_i - x_j\| > a_1$

تئوری ۲: برای یک سیستم چندعامله با دینامیک درجه دو و توپولوژی ارتباطی دینامیک و کنترل کننده سه حالته شکل (۱)، اگر سیستم در حالت دوم با کنترل کننده (۹) قرار داشته باشند و تعداد عامل‌های مخرب از F بیشتر نباشد، هیچ‌گاه به حالت اول باز نخواهند گشت و سرعت عامل‌ها به توافق تاب‌آور می‌رسند.

اثبات: برای اثبات تئوری ۲ باید نشان دهیم که $0 \leq \frac{d\lambda_2}{dt}$ است.

$$\frac{d\lambda_2}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \lambda_2}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \lambda_2}{\partial x_i} v_i \quad (29)$$

با استفاده از chain rule و رابطه (۲۹) می‌توانیم بنویسیم:

$$0 \leq \frac{\partial \lambda_2}{\partial x_i} v_i \quad (30)$$

$$0 \leq [g_{i,\alpha} \ g_{i,\beta}] \cdot [v_{i,\alpha} \ v_{i,\beta}]^T \quad (31)$$

$$\hat{g}_{i,\alpha} = g_{i,\alpha} \pm e_{g_{i,\alpha}} \quad (32)$$

$$\max e_{g_{i,\alpha}} = \sum_{j=1}^n C_{j,\alpha} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \quad (33)$$

$$0 \leq [\hat{g}_{i,\alpha} \pm e_{g_{i,\alpha}} \ \hat{g}_{i,\beta} \pm e_{g_{i,\beta}}] \cdot [v_{i,\alpha} \ v_{i,\beta}]^T \quad (34)$$

برای تعیین صحت نامساوی (۳۴) باید علامت المان‌های بردار v_i را مشخص کنیم. اگر $v_{i,\alpha}, v_{i,\beta} \geq 0$ باشد، رابطه (۳۴) را به شکل زیر می‌توانیم بازنویسی کنیم:

$$0 \leq [\hat{g}_{i,\alpha} - e_{g_{i,\alpha}} \ \hat{g}_{i,\beta} - e_{g_{i,\beta}}] \cdot [v_{i,\alpha} \ v_{i,\beta}]^T \quad (35)$$

با جاگذاری مدل عامل و کنترل کننده (۹) در رابطه (۳۵) به رابطه (۳۶) دست پیدا می‌کنیم.

$$\varepsilon \leq \quad (36)$$

$$\frac{\left(\hat{v}_{i2}^T - \left[\sum_{j=1}^n C_{j,\alpha} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \sum_{j=1}^n C_{j,\beta} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \right]^T \right) v_i}{\|\hat{v}_{i2}\|^2 - \left[\sum_{j=1}^n C_{j,\alpha} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \sum_{j=1}^n C_{j,\beta} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \right]^T} \cdot \hat{v}_{i2}$$

در صورتی که $v_{i,\alpha}, v_{i,\beta} \geq 0$ و رابطه (۳۶) برقرار باشد، $\frac{d\lambda_2}{dt} \geq 0$ تضمین می‌شود. اگر $v_{i,\alpha}, v_{i,\beta} < 0$ باشد، رابطه (۳۶) به رابطه (۳۷) تبدیل می‌شود.

$$0 \leq [\hat{g}_{i,\alpha} + e_{g_{i,\alpha}} \ \hat{g}_{i,\beta} + e_{g_{i,\beta}}] \cdot [v_{i,\alpha} \ v_{i,\beta}]^T \quad (37)$$

در این شرایط با جاگذاری مدل عامل و کنترل کننده (۹) در رابطه (۳۷) نامساوی حاصل می‌شود.

$$\varepsilon \leq \quad (38)$$

$$\frac{\left(\hat{v}_{i2}^T + \left[\sum_{j=1}^n C_{j,\alpha} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \sum_{j=1}^n C_{j,\beta} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \right]^T \right) v_i}{\|\hat{v}_{i2}\|^2 + \left[\sum_{j=1}^n C_{j,\alpha} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \sum_{j=1}^n C_{j,\beta} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \right]^T} \cdot \hat{v}_{i2}$$

$$\varepsilon \leq \quad (39)$$

$$\frac{\partial \hat{A}_{ij}}{\partial x_{i,\alpha}} = K \cdot \frac{\hat{x}_{j,\alpha} - x_{i,\alpha}}{\|x_i - \hat{x}_j\|} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - \hat{x}_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)}, K = \frac{\gamma}{R - \rho}$$

$$\hat{x}_j = x_j + E_{j,1}$$

$$\hat{x}_{j,\alpha} = x_{j,\alpha} + e_{j,1,\alpha}$$

حال به بررسی اولین عبارت سمت راست نامساوی (۲۲) با $j = 1$ و $i \neq j$ می‌پردازیم.

$$\left| \hat{v}_{12}^2 \frac{\partial \hat{A}_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{12}^2 \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| = \quad (23)$$

$$\left| K \cdot \hat{v}_{12}^2 \cdot \frac{x_{1,\alpha} + e_{1,\alpha} - x_{i,\alpha}}{\|x_i - x_1 - E_{11}\|} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_1 - E_{11}\| - \rho)}{R - \rho}\right)} - K \cdot v_{12}^2 \cdot \frac{x_{1,\alpha} - x_{i,\alpha}}{\|x_i - x_1\|} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_1\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \right|$$

می‌توانیم معادله (۲۳) را به صورت نامعادله (۲۴) بازنویسی کنیم.

$$\left| \hat{v}_{12}^2 \frac{\partial \hat{A}_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{12}^2 \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| \leq \quad (24)$$

$$K \cdot e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_1\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \left(\hat{v}_{12}^2 \cdot e^{\frac{\gamma(\|E_{11}\|)}{R - \rho}} \cdot \left| \frac{x_{1,\alpha} - x_{i,\alpha} + e_{1,\alpha}}{\|x_i - x_1\| - \|E_{11}\|} \right| + v_{12}^2 \cdot \frac{|x_{1,\alpha} - x_{i,\alpha}|}{\|x_i - x_1\|} \right) +$$

اگر $k = k_l^1$ باشد $\|E_{11}\|$ و $e_{1,\alpha}$ برابر صفر می‌شود، در نتیجه:

$$\left| \hat{v}_{12}^2 \frac{\partial \hat{A}_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{12}^2 \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| \leq h'_{1,\alpha} \cdot e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_1\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \quad (25)$$

$$h'_{1,\alpha} = K \cdot \frac{|x_{1,\alpha} - x_{i,\alpha}|}{\|x_i - x_1\|} (\hat{v}_{12}^2 + v_{12}^2)$$

و اگر در $k \in (k_l^1, k_{l+1}^1)$ قرار داشته باشیم، $f_{1,1} < 0$ است. پس $\|E_j\| < a_1 + b_1 e^{-c_1(k+1)}$ و $|e_{j,\alpha}| < a_1 + b_1 e^{-c_1(k+1)}$ در صورتی که $a_1 = 0$ و $k \rightarrow \infty$ داریم:

$$\left| \hat{v}_{12}^2 \frac{\partial \hat{A}_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{12}^2 \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| \leq h'_{1,\alpha} \cdot e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_1\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \quad (26)$$

و در صورتی که $a_1 \neq 0$ و $k \rightarrow \infty$ داریم:

$$\left| \hat{v}_{12}^2 \frac{\partial \hat{A}_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} - v_{12}^2 \frac{\partial A_{1i}}{\partial x_{i,\alpha}} \right| \leq h_{1,\alpha} \cdot e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_1\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \quad (27)$$

با انجام عملیاتی مشابه عملیات فوق برای تمام عبارات‌ها در سمت راست نامساوی (۲۲) می‌توانیم بنویسیم:

$$\|\hat{g}_{i,\alpha} - g_{i,\alpha}\| \leq \sum_{j=1}^n C_{j,\alpha} e^{\left(\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}\right)} \quad (28)$$

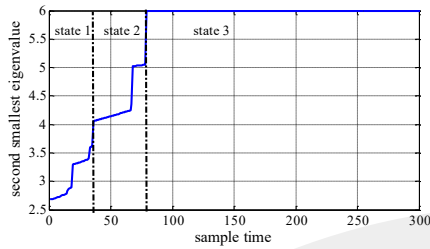
$$C_{j,\alpha} = h_{j,\alpha} + 2p_{j,\alpha} + r_{j,\alpha}$$

$$h_{j,\alpha} = K \cdot \left(\hat{v}_{j2}^2 \cdot e^{\frac{\gamma a_1}{R - \rho}} \cdot \left| \frac{x_{j,\alpha} - x_{i,\alpha} + a_1}{\|x_i - x_j\| - a_1} \right| + v_{j2}^2 \cdot \frac{|x_{j,\alpha} - x_{i,\alpha}|}{\|x_i - x_j\|} \right)$$

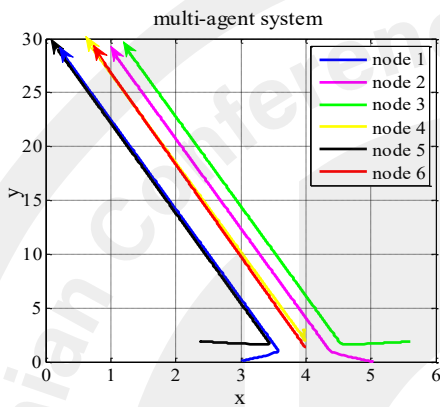
$$p_{j,\alpha} = K \cdot \left(\hat{v}_{j2} \cdot v_{j2} \cdot e^{\frac{\gamma a_1}{R - \rho}} \cdot \left| \frac{x_{j,\alpha} - x_{i,\alpha} + a_1}{\|x_i - x_j\| - a_1} \right| + v_{j2} \cdot v_{j2} \cdot \frac{|x_{j,\alpha} - x_{i,\alpha}|}{\|x_i - x_j\|} \right)$$

$$r_{j,\alpha} = K \cdot \left(\hat{v}_{j2}^2 \cdot e^{\frac{\gamma a_1}{R - \rho}} \cdot \left| \frac{x_{j,\alpha} - x_{i,\alpha} + a_1}{\|x_i - x_j\| - a_1} \right| + v_{j2}^2 \cdot \frac{|x_{j,\alpha} - x_{i,\alpha}|}{\|x_i - x_j\|} \right)$$

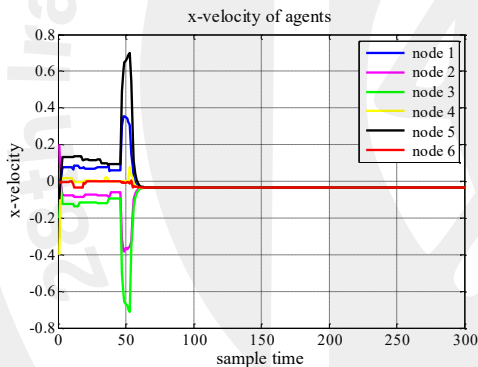
با استفاده از رابطه (۲۸) برای تمام المان‌های $\hat{v}_{i2} - v_{i2}$ رابطه (۱۵) به دست می‌آید. باید توجه شود در این اثبات فرض شده



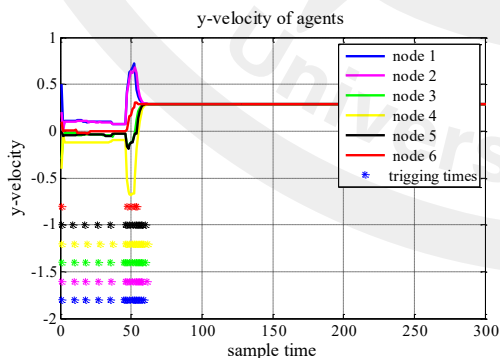
شکل ۲-۴ نمودار λ_2



شکل ۳-۴ سیستم چندعامله با مکانیزم رویداد-تحریک و بدون حمله



شکل ۴-۴ همگرا شدن سرعت عامل‌ها در راستای x با مکانیزم رویداد-تحریک و بدون حمله



شکل ۵-۴ همگرا شدن سرعت عامل‌ها در راستای y با مکانیزم رویداد-تحریک و بدون حمله

در آزمایش بعدی حمله ثابت را به عامل ششم اعمال می‌کنیم. همانطور که در شکل ۶-۴ مشخص است علاوه بر منحرف شدن

$$\left(\hat{v}_i \lambda_2^T + \left[-\sum_{j=1}^n C_{j,\alpha} e^{\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}} \quad \sum_{j=1}^n C_{j,\beta} e^{\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}} \right]^T \right) \hat{v}_i$$

$$\| \hat{v}_i \lambda_2 \|^2 + \left[-\sum_{j=1}^n C_{j,\alpha} e^{\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}} \quad \sum_{j=1}^n C_{j,\beta} e^{\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}} \right]^T \cdot \hat{v}_i \lambda_2$$

$$\mathcal{E} \leq \quad (40)$$

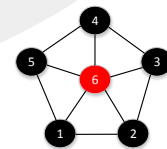
$$\left(\hat{v}_i \lambda_2^T + \left[\sum_{j=1}^n C_{j,\alpha} e^{\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}} \quad -\sum_{j=1}^n C_{j,\beta} e^{\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}} \right]^T \right) \hat{v}_i$$

$$\| \hat{v}_i \lambda_2 \|^2 + \left[\sum_{j=1}^n C_{j,\alpha} e^{\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}} \quad -\sum_{j=1}^n C_{j,\beta} e^{\frac{-\gamma(\|x_i - x_j\| - \rho)}{R - \rho}} \right]^T \cdot \hat{v}_i \lambda_2$$

به همین شیوه برای دو حالت $v_{i,\beta} \geq 0$ و $v_{i,\alpha} \geq 0$, $v_{i,\beta} < 0$ و $v_{i,\alpha} < 0$ در رابطه (۳۹) و (۴۰) دست می‌آید. در حالت دو و سه تضمین می‌شود که سیستم (2F + robust - 1) است. پس طبق نتایج [۱۰] سرعت عامل‌ها به یک بردار مشترک همگرا می‌شوند.

۴- شبیه‌سازی

در این بخش با شبیه‌سازی یک سیستم چندعامله با $n = 6$ و دینامیک (۲) صحت و نحوه عملکرد روش پیشنهادی را بررسی می‌کنیم. موقعیت‌های اولیه مطابق شکل ۱-۴ می‌باشد و عامل تحت حمله در مرکز قرار می‌گیرد. پارامترهای سیستم به صورت $\gamma = 0.5$, $\eta_1 = \frac{8}{6}$, $\eta_2 = \frac{7}{6}$, $\rho = 1.5$, $R = 4$, $T = 0.1$, $F = 1$, $a_1 = a_2 = 0.1$, $a_3 = 0.01$, $b_1 = b_2 = 0.1$, $b_3 = 0.01$, $c_1 = c_2 = c_3 = 2$. تنظیم می‌شوند. در آزمایش اول سیستم را بدون حمله بررسی می‌کنیم. مطابق شکل ۲-۴ عامل‌ها ابتدا در حالت یک قرار دارند و به یکدیگر نزدیک می‌شوند تا زمانی که λ_2 به محدوده مجاز برسد، سپس وارد حالت دو و سه می‌شوند و شروع به هم‌سرعت شدن می‌کنند. نحوه حرکت عامل‌ها در فضای دو بعدی در شکل ۳-۴ دیده می‌شود. شکل‌های ۴-۴ و ۵-۴ نشان می‌دهند که سرعت تمام عامل‌ها در راستای x و y به هم همگرا شده‌اند. تعداد ارسال داده برای هر عامل نسبت به حالت زمان-تحریک به میزان قابل توجهی کاهش یافته است (شکل ۴-۵)، به طوری که بعد از همگرا شدن سرعت عامل‌ها هیچ تبادل داده‌ای صورت نگرفته است.



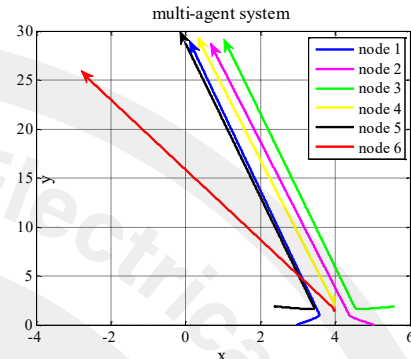
شکل ۱-۴ سیستم چندعامله

میزان قابل توجهی کاهش یابد. برخلاف تحقیقات قبلی، این روش به شکل کاملاً توزیع شده ارائه شد و همگرایی آن مورد بررسی قرار گرفت و همچنین تضمین شد که ساختار کنترلی پیشنهادی می-تواند سیستم را با تنظیم فاصله نسبی بین عامل‌ها و برقراری توافق روی سرعت‌ها به حرکت گروهی تاب‌آور برساند. در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته توانایی سیستم کنترلی در دفع حملات و کاهش ارتباطات اضافی بین عامل‌ها سنجیده شد. برای کارهای آینده می-توان بر روی مکانیزم‌های خود-تحریک و یا سیستم‌های غیرهمگن تحقیق و بررسی انجام داد.

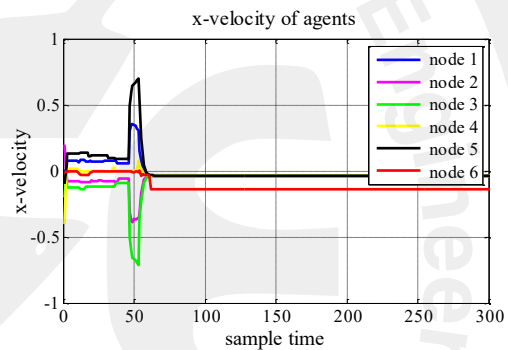
مراجع

- [1] J. Qin, Q. Ma, Y. Shi, and L. Wang, "Recent advances in consensus of multi-agent systems: A brief survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 4972-4983, 2017.
- [2] R. Olfati-Saber, J. A. Fax, and R. M. Murray, "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 215-233, 2007.
- [3] L. Ding, Q.-L. Han, X. Ge, and X.-M. Zhang, "An overview of recent advances in event-triggered consensus of multiagent systems," *IEEE transactions on cybernetics*, vol. 48, no. 4, pp. 1110-1123, 2018.
- [4] R. Olfati-Saber, "Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory," CALIFORNIA INST OF TECH PASADENA CONTROL AND DYNAMICAL SYSTEMS2004.
- [5] R. Moghadam and H. Modares, "Resilient Autonomous Control of Distributed Multiagent Systems in Contested Environments," *IEEE transactions on cybernetics*, no. 99, pp. 1-11, 2018.
- [6] S. M. Dibaji and H. Ishii, "Resilient consensus of second-order agent networks: Asynchronous update rules with delays," *Automatica*, vol. 81, pp. 123-132, 2017.
- [7] H. Rezaee and F. Abdollahi, "Resilient Attitude Alignment in Multispacecraft Systems," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019.
- [8] K. Saulnier, D. Saldana, A. Prorok, G. J. Pappas, and V. Kumar, "Resilient flocking for mobile robot teams," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 1039-1046, 2017.
- [9] M. C. De Gennaro and A. Jadbabaie, "Decentralized control of connectivity for multi-agent systems," in *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*, 2006, pp. 3628-3633: IEEE.
- [11] Y. Wang and H. Ishii, "Resilient consensus through asynchronous event-based communication," in *2019 American Control Conference (ACC)*, 2019, pp. 1842-1847: IEEE.

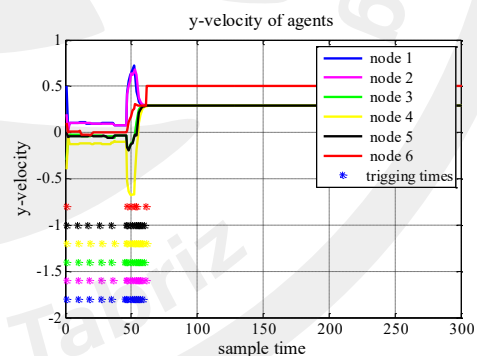
عامل شش از مسیر اصلی بقیه عامل‌ها در مسیر اصلی خود به درستی به حرکت ادامه می‌دهند. در شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ سرعت توافق و سیگنال حمله در دو راستای x و y مشخصاً قابل مشاهده است.



شکل ۴-۶ سیستم چندعامله با مکانیزم رویداد-تحریک و حمله به عامل ۶



شکل ۴-۷ همگرا شدن سرعت عامل‌ها در راستای x با مکانیزم رویداد-تحریک و حمله به عامل ۶



شکل ۴-۸ همگرا شدن سرعت عامل‌ها در راستای y با مکانیزم رویداد-تحریک و حمله به عامل ۶

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک کنترل‌کننده رویداد-تحریک برای کنترل حرکت گروهی یک سیستم چندعامله با دینامیک درجه دو و در حضور حملات سایبری طراحی شد. در روش پیشنهادی ما، استفاده از رویکرد رویداد-تحریک باعث شد تا تبادل داده بین عامل‌ها به