

# یک الگوریتم دسته بندی جدید برای پهپادها با استفاده از رویکرد کنترل توزیع شده

امیر زارع\*<sup>۱</sup>، ابوالفضل مختاری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق، دانشگاه امیرکبیر، تهران، ایران  
۲- استاد، گروه مهندسی، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه امام علی (ع)، تهران، ایران  
(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲)

## چکیده

در سال‌های اخیر، با توسعه فناوری پهپاد در زمینه‌های مختلف از جمله صنایع نظامی، مخابرات، تحقیقات هواشناسی و جاسوسی و ...، مطالعات در مورد حرکت جمعی پهپادها مورد توجه دانشمندان مختلف قرار گرفته است. این نوشته با بهبود الگوریتم فلاکینگ الفتی صابر هدفهایی از جمله اطمینان از امنیت اطلاعات پهپادها، به حداکثر رساندن برد تشخیص گروه پهپاد و به حداقل رساندن برد ارتباطی را پیگیری می‌کند. الگوریتم کنترلی بهبود یافته می‌تواند به ردیابی کردن سرعت رهبرهای مجازی توسط هر یک از عامل‌ها کمک کند. سپس مفهومی به نام دایره ارتباط مجازی برای کنترل قدرت ارتباطی هر پهپاد معرفی می‌شود تا از عدم برخورد و ارتباط پایدار اطمینان حاصل شود. پهپادهای متعدد می‌توانند رهبر مجازی را برای پرواز به صورت دسته‌ای ردیابی کنند و یک استراتژی کنترل مشارکتی توزیع شده را می‌توان به دست آورد. نتایج شبیه‌سازی در انتهای این نوشته اثر بخشی این الگوریتم برای سیستم گروهی پهپادها را به خوبی نشان می‌دهد.  
واژه‌های کلیدی: چندعاملی، پهپاد، حرکت گروهی، کنترل توزیع شده

## A New Flocking Algorithm for UAVs Using a Distributed Control Approach

### Abstract

In recent years, with the development of Unmanned aerial vehicle (UAV) technology in various fields such as military industry, telecommunications, meteorological research, espionage, etc. Studies on the mass movement of UAVs have attracted the attention of various scientists. This article pursues objectives such as ensuring the information security of UAV groups, maximizing the UAV group detection range, and minimizing the communication range by improving the Olfati Saber's flocking algorithm. An improved control algorithm can help track the speed of virtual leaders by each agent. Then we introduce a concept called virtual communication circle to control the communication power of each UAV to ensure no collisions and stable communication. Multiple UAVs can track the virtual leader for batch flight, and a distributed participatory control strategy can be achieved. The simulation results at the end of this paper show the effectiveness of this algorithm for the group system of UAVs.

**Keywords:** Multi-agent, UAV, Group movement, Distributed control

## مقدمه

حرکت فلاکینگ<sup>۱</sup> رفتاری است که گروهی از پرندگان هنگام جستجوی علوفه یا در حال پرواز از خود نشان می‌دهند. رفتاری ناشی از یک سری قوانین ساده که توسط عامل‌ها رعایت می‌شود و شامل هیچ هماهنگی مرکزی نمی‌شود. حرکت دسته جمعی پهبادهای در قالب حرکت فلاکینگ همانند نوعی سیستم حرکتی در طبیعت است که از گروهی از ربات‌های هوایی تشکیل شده است که در مقایسه با سیستم چند پهباد کلاسیک، دارای مزایای منحصربه‌فردی مانند مقیاس پذیری، انعطاف پذیری و کاربردهای بسیار دیگر است. در واقع هوش جمعی حاصل تعامل و همکاری افراد یا عامل‌های تنها است که می‌تواند برای الگوریتم‌های بهینه سازی، مانند الگوریتم بهینه سازی ژنتیک اعمال شود. با طراحی یک الگوریتم کنترلی خاص یا اعمال الگوریتم بهینه سازی هوش جمعی، سیستم به طور کلی می‌تواند رفتارهای مورد نظر را ارائه دهد.

از دیدگاه ساختار کنترلی برای چند پهباد، رویکردهای کنترل فلاک<sup>۲</sup> موجود را می‌توان به روش متمرکز طبقه‌بندی کرد، که در آن از یک کنترل کننده واحد برای کنترل کل تیم بر اساس اطلاعات تیم [۱] و روش توزیع شده یا غیرمتمرکز استفاده می‌شود. جایی که هر یک از اعضای تیم کنترل خود را بر اساس اطلاعات محلی از همسایگان خود تولید می‌کند [۲-۵]. کنترل متمرکز فلاک می‌تواند استراتژی خوبی برای تیم کوچکی از پهبادهای باشد. هنگام در نظر گرفتن تیمی با تعداد زیادی پهباد، نیاز به ظرفیت محاسباتی بیشتر و پهنای باند ارتباطی زیاد، کنترل توزیع شده یا غیرمتمرکز را الزامی می‌کند. از منظر مکانیسم کنترل، رویکردهای کنترل گله را می‌توان به رویکردهای مبتنی بر اجماع [۶-۷]، رویکردهای مبتنی بر تابع پتانسیل [۸-۹]، و رویکردهای رهبر-پیرو [۱۰-۱۱] طبقه بندی کرد.

از مزیت‌های سیستم پهباد گروهی حساس نبودن نسبت به شکست و خطای فردی است که کنترل متمرکز دارای این قابلیت نیست. در چنین سیستمی، پهباد عاملی با استقلال

کامل است که برای هماهنگی با بسیاری از عامل‌های مستقل نیازی به واحد کنترل مرکزی ندارد. بنابراین، فرد می‌تواند بدون انتظار برای فرمان و اطلاعات واحد کنترل مرکزی به سرعت و انعطاف پذیری به محیط پویا پاسخ دهد. مطالعات در این زمینه در حال حاضر محدود است و تعداد کمی از مؤسسات تحقیقاتی علمی روی استراتژی‌های کنترل مشترک و حفاظت از امنیت گروه‌های پهباد کار کرده‌اند:

الفتی صابر در مقاله خود نشان داده است که مهاجرت فلاک‌ها را می‌توان با استفاده از یک شبکه هم‌تا به هم‌تا از عوامل انجام داد، به عنوان مثال، "فلاک‌ها نیازی به رهبر ندارند." یک تعریف "جهانی" از فلاک برای سیستم‌های جزئی شبیه به پایداری لیاپانوف<sup>۳</sup> ارائه شده است [۱۲-۱۵]. سون هو<sup>۴</sup> یکپارچگی ارگانیک بین رویکرد بالا به پایین و رویکرد پایین به بالا را از طریق سیستم چند عاملی پیشنهاد کرد و یک الگوریتم پرواز را پیشنهاد کرده که می‌تواند ماموریت انعطاف‌پذیر را از طریق آن انجام دهد. [۱۶]. جولیان<sup>۵</sup> بحث کنترل ردیابی جمعی را برای حرکت پهبادهای خودمختار<sup>۶</sup> چند عاملی ارائه می‌کند که در آن فلاکینگ برای یک شکل مثلثی بدون رهبر تعریف شده و با استفاده از مفهوم ردیابی جمعی اجرا می‌شود [۱۷]. ناگاتا<sup>۷</sup> تأثیر رفتار منظم فرآیند جستجوی کلونی مورچه‌ها را تشریح کرد، سازماندهی وظایف چند پهباد را مورد مطالعه قرار داد و الگوریتمی را برای بهبود کارایی اجرای وظایف پهباد و کاهش تداخل کلی کانال در طول ارتباط پیشنهاد کرد [۱۸]. ژاو<sup>۸</sup> [۱۹] یک الگوریتم جلوگیری از برخورد با مانع را با تعامل محلی اطلاعات پیشنهاد می‌کند. برای اینکه پهباد مسیر مورد نظر را با اجماع وضعیت بهتر دنبال کند، الگوریتم کنترل فلاک عوامل را با توجه به ویژگی‌ها و الزامات پهبادهای به‌بود داده است. در [۲۰] نیز تابع پتانسیل الگوریتم کنترل شکل‌گیری بهبود یافته و این الگوریتم را برای پهباد رهبر مجازی تک و پهباد رهبر چند مجازی اعمال می‌کند که این الگوریتم می‌تواند اطمینان حاصل کند که سرعت پهباد در شکل‌گیری با سرعت پهباد رهبر مجازی سازگار است. همچنین در [۲۱] لیو<sup>۹</sup>

<sup>۶</sup> Autonomous

<sup>۷</sup> Nagata

<sup>۸</sup> Zhao

<sup>۹</sup> Liu

<sup>۱</sup> Flocking

<sup>۲</sup> Flock

<sup>۳</sup> Lyapunov

<sup>۴</sup> Sun-ho

<sup>۵</sup> Joelianto

قابل توجهی سربار ارتباط کل گروه را کاهش می‌دهد. انبوه شبکه ادهاک<sup>۱۰</sup> پرواز را می‌توان به روشی خودسازماندهی بدون استفاده از یک مرکز کنترل خارجی از طریق پروتکل های کنترل توزیع شده به دست آورد.

در این مقاله ابتدا مساله تجمع پهپادهای گروهی بررسی شده است. مساله امنیت ارتباطات چند پهپاد با مطالعه رابطه بین ارتباطات چند پهپاد و توپولوژی شبکه، اندازه گروه و غیره بررسی شده است. برای حل این مساله، یک روش کنترل مشارکتی توزیع شده با بهبود الگوریتم هوشمند در هوش جمعی ارائه شده است که به بررسی عوامل ارتباطی مؤثر بر دینامیک گروه پهپاد می‌پردازد تا امنیت اطلاعات گروه پهپاد را تضمین کند و به هدف به حداکثر رساندن برد تشخیص گروه پهپاد و به حداقل رساندن برد ارتباطی آن دست یابد. در بخش انتهایی مثالی برای کارایی این الگوریتم ارائه شده است. ادامه مقاله به شرح زیر است در بخش ۲ مدل اصلی پهپاد و قوانین ارتباطی مرتبط ارائه شده است. سپس الگوریتم کنترل فلاکینگ نیز معرفی می‌شود. در بخش ۳ طرح بهبود یافته بر اساس الگوریتم فلاکینگ بهبود یافته با رهبر مجازی ارائه شده و یک طرح ارتباطی کامل پهپاد پیشنهاد شده است. در بخش ۴ شبیه سازی ها و تجزیه و تحلیل نتایج مربوطه را برای تأیید نتیجه کار انجام شده است. در نهایت، این مقاله در بخش ۵ با یک نتیجه گیری کلی پایان می‌پذیرد.

### مدل حرکتی پهپادها

مدل حرکت پهپاد  $i$  ام با معادلات دیفرانسیل زیر توضیح داده شده است [۲۵]:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \cos \chi_i \cos \gamma_i \\ \dot{y}_i &= v_i \sin \chi_i \cos \gamma_i \\ \dot{z}_i &= v_i \sin \gamma_i \\ \dot{V}_i &= -g \sin \gamma_i + \frac{1}{m} T_i - D_i \\ \chi_i &= \frac{L_i \sin \phi_i}{m_i V_i \cos \gamma_i} \\ \gamma_i &= \frac{L_i \cos \phi_i - m_i g \cos \gamma_i}{m_i V_i} \end{aligned} \quad (1)$$

به منظور تنظیم مناسب فاصله بین عامل مناسب برای تحقق، قانون کنترل را بر اساس تئوری فلاک پرندگان بهینه کرد و همگرایی سرعت ها را مورد بررسی قرار داد علاوه بر این، حرکت جمعی پایدار دو پهپاد را با استفاده از اطلاعات نسبی بصری تنها با استراتژی پیشنهادی در هر دو محیط داخلی و خارجی فاقد موقعیت یاب محقق کرد. قانون کنترل با استفاده از روش کنترل بهینه که مستقل از تعداد پهپادهای موجود در فلاک است در [۲۲] بررسی شده است.

در سال‌های اخیر نیز پیرامون این موضوع تحقیقات زیادی انجام شده از جمله در [۲۳] پنگ یان کنترل دسته جمعی پهپاد های گروهی به دلیل کاربردهای گسترده آن را مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله، مساله کنترل هجوم پهپاد به عنوان یک فرآیند تصمیم‌گیری مارکوف قابل مشاهده جزئی فرموله می‌شود که در آن محدودیت‌های محدوده ارتباط و درک پهپاد در نظر گرفته می‌شود. یک رویکرد یادگیری تقویتی عمیق برای حل این مساله با آموزش متمرکز و شیوه اجرای غیرمتمرکز پیشنهاد شده است. تجربه جمع‌آوری شده توسط همه پهپادها برای آموزش خط مشی کنترل فلاک مشترک استفاده می‌شود و هر پهپاد بر اساس اطلاعات محیط محلی که مشاهده می‌کند، اقداماتی را انجام می‌دهد. برای فعال کردن پهپادهای گروه برای حفظ یک فلاک و حرکت در محیطی با موانع متراکم، یک تابع پاداش با در نظر گرفتن رسیدن به هدف، اجتناب از موانع نگهداری فلاک ساخته شده است. همچنین لیو در [۲۴] تحقیق کرده است که برای رسیدگی به مسائل انبوه یک هواپیمای بدون سرنشین که در حالت رهبر-پیرو کار می‌کند، باید پروتکل‌های کنترل توزیع‌شده شامل کنترل‌کننده جنبشی و الگوریتم کنترل توپولوژی اجرا شود. برای جمع کردن گروه پهپادها، یک روش کنترل ورودی توزیع شده هم برای حفظ حالت نسبتاً ثابت بین وسایل نقلیه همسایه (شامل تطبیق سرعت و حفظ فاصله) و هم برای جلوگیری از برخورد وسیله نقلیه به وسیله نقلیه مورد نیاز است. علاوه بر این، پایداری پروتکل‌های کنترل باید با استفاده از تابع انرژی پتانسیل تجزیه و تحلیل شود. به طور خاص، یک قانون آزمایش زاویه توزیع شده در موضوع کنترل توپولوژی پیشنهادی ممکن است به هر پهپاد اجازه دهد مجموعه همسایه خود را با بهره‌برداری از اطلاعات حس شده محلی تعیین کند، در نتیجه به طور

<sup>۱۰</sup> ad-hoc

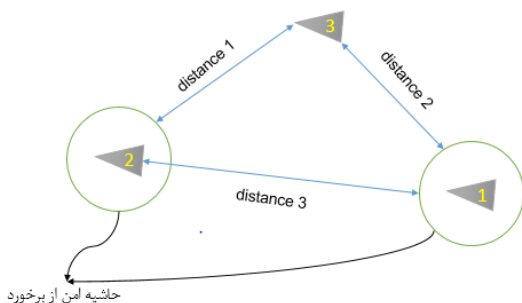
رابطه اطلاعات بین پهپادها یا ل‌های گراف باشد، سیستم چند پهپاد را می‌توان به عنوان یک گراف مدل کرد، بنابراین می‌توان از گراف برای توصیف رابطه انتقال اطلاعات بین پهپادها استفاده کرد.

تعریف توپولوژی ارتباطی برای ایجاد مدل شبکه ارتباطی سیستم ارائه شده است: توپولوژی ارتباطی با  $G = \{V, E\}$  نشان داده شده است، که در آن مجموعه گره  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  نشان دهنده  $n$  پهپادها است.

مجموعه جانبی  $E = \{(i, j) \in V \times V \mid i \sim j\}$  مجموعه‌ای از پیوندهای ارتباطی بین پهپادها را نشان می‌دهد. هنگامی که ارتباط یک طرفه بین پهپادها وجود دارد، توپولوژی ارتباطی یک گراف جهت‌دار است. وقتی همه ارتباطات بین پهپادها دو طرفه هستند، توپولوژی ارتباطی بدون جهت است. در گراف توپولوژی ارتباطات، ماتریس همسایه  $A = [a_{ij}]$  است، اگر

$a_{ij} = 1$  و  $(j, i) \in E$ ؛ در غیر این صورت،  $a_{ij} = 0$ . اگر سمت جهت‌دار  $(j, i) \in E$ ، یعنی سمت جهت‌دار از  $j$  به  $i$  وجود داشته باشد، به این معنی است که  $j$  در حال انتقال اطلاعات وضعیت به  $i$  است. سپس پهپاد  $j$  همسایه پهپاد  $i$  است. مجموعه پهپاد همسایه  $i$  را می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$N_i = \{j \in V \mid a_{ij} = 1\} = \{j \in V \mid (j, i) \in E\} \quad (6)$$



شکل ۱. تعریف فاصله هواپیما در صفحه افقی

### الگوریتم کنترل فلاکینگ با رهبر مجازی

معادلات بالا رابطه بین بردار وضعیت  $X = [x_i, y_i, z_i, v_i, \chi_i, \gamma_i]^T$  و بردار ورودی کنترل  $U = [\phi_i, L_i, T_i]^T$  را توصیف می‌کند که  $(x_i, y_i, z_i)$  موقعیت اینرسی پهپاد است،  $\chi_i, \gamma_i, \phi_i$  نشان دهنده بلبرینگ مسیر، شیب مسیر و زاویه رول است.  $L_i$  و  $D_i$  نیروی بالابر و درگ هستند.  $v_i, m_i, g$  سرعت خط و شتاب گرانشی هستند. متغیر  $q$  را به شکل  $q = (x_i, y_i, z_i)^T$  تعریف می‌کنیم و مشتق آن نسبت به زمان به شکل زیر بدست می‌آید:

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_i \cos \gamma_i \cos \psi_i \\ v_i \cos \gamma_i \sin \psi_i \\ v_i \sin \gamma_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

ورودی کنترلی جدید به شکل زیر معرفی می‌شود.

$$U' = \begin{bmatrix} u'_1 \\ u'_2 \\ u'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (T_i - D_i)/m_i \\ L_i \cos \phi_i / m_i g \\ L_i \sin \phi_i / m_i g \end{bmatrix} \quad (3)$$

سپس مدل غیرخطی پهپاد را می‌توان به یک مدل انتگرال درجه دوم تبدیل کرد.

$$\ddot{q} = u_l \quad (4)$$

بنابراین، سیستم گروهی تشکیل شده توسط پهپادها را می‌توان به صورت اشکال برداری مانند

$$\begin{aligned} \dot{q} &= p \\ \dot{p} &= u \end{aligned} \quad (5)$$

که در آن  $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$  بردار مکان سیستم،  $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$  و  $p = [p_1, p_2, \dots, p_n]^T$  بردار سرعت و ورودی کنترل است، تعریف نمود.

### مدل ارتباطی پهپادها

در سیستم پهپاد، اطلاعات وضعیت از طریق ارتباط بی‌سیم بین پهپادهای خودمختار منتقل می‌شود. مدل شبکه ارتباطی، نشان دهنده رابطه بین پهپادها در راه ارتباط بی‌سیم است. اگر هر پهپاد به عنوان یک گره در گراف جبری در نظر گرفته شود و

ثابت با رهبر مجازی مطابقت دهد. بنابراین، فرم ورودی کنترل عامل  $i$  در سیستم باید به صورت زیر طراحی شود:

$$u_i = f_i + h_i + \gamma_i \dots i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

که در آن تابع انرژی است. همه عوامل در سیستم به هم متصل می‌شوند و موقعیت آنها به تدریج به یک محدوده خاص همگرا می‌شود. در فرآیند همگرایی، عوامل می‌توانند از برخورد با یکدیگر جلوگیری کنند.  $h_i$  آیتم کنترل سرعت است که باعث می‌شود سرعت تمام عوامل در سیستم به تدریج به یک مقدار برسد.  $\gamma_i$  یک مولفه بازخورد اطلاعات رهبر است که هدف آن فعال کردن همه عوامل در سیستم برای ردیابی رهبر مجازی است.

### بیان مساله

مدل متحرک هر پهپاد در سیستم گروهی که توسط  $n$  پهپاد مستقل تشکیل شده است به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{q}_i = \dot{p}_i \\ \dot{p}_i = u_i \end{cases} \quad (1)$$

که در آن موقعیت پهپاد  $i$  ام است،  $p_i$  سرعت و  $u_i$  ورودی کنترلی آن است. معادله حرکت رهبر مجازی به صورت زیر است:

$$\begin{cases} \dot{q}_0 = p_0 \\ \dot{p}_0 = a_0 \end{cases} \quad (2)$$

اگر شعاع ارتباطی پهپادها در سیستم یکسان باشد، ناحیه ارتباطی دایره ای در همسایگی  $i$  است. این مجموعه مجاورت به شکل زیر است:

$$N_i = \{j \in V \mid a_{ij} = 1\} \\ = \{j \mid \|q_i - q_j\| \leq r\} \quad (3)$$

حال باید یک استراتژی کنترلی طراحی کرد تا همگرایی، جلوگیری از برخورد و سرعت همه پهپادها در سیستم ثابت بماند، یعنی سیستم پهپاد گروهی به حالت حرکت گروهی دست یابد

با فرض اینکه عامل هوشمند به عنوان گره  $i$  باشد، از یال‌های غیر جهت‌دار برای اتصال تمام گره‌ها در ناحیه همسایه  $i$  استفاده می‌کنیم. سپس، در زمان  $t$ ، شبکه متشکل از این گره‌ها  $V = \{1, 2, \dots, N\}$  و یال  $E(t) = \{(i, j) \in V \times V : i \sim j\}$  می‌تواند بیانگر یک ماتریس  $G(t)$  باشد. از آنجایی که برای یک عامل هوشمند مشخص، برخی از عوامل هوشمند در محدوده منطقه همسایه خود به همان منطقه حرکت می‌کنند، یا برخی از عوامل هوشمند خارج از محدوده منطقه همسایه خود به منطقه همسایه خود حرکت می‌کنند، سیستم دارای توپولوژی قابل تغییر است. الگوریتم کنترل فلاکینگ را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$u_i = - \sum_{j \in N_i(t)} \nabla q_i \psi_a (\|q_{ij} - q_{r_i}\|_a) \\ - \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t) (p_{ij} - p_{r_1}) \\ + f_{r_1}(q_{r_i}, p_{r_i}) + c_1 (q_{r_i} - q_i) + c_2 (p_{r_f} - p_i) \quad (7)$$

که در آن ثابت  $c_1$  و  $c_2$  نشان دهنده ضریب بازخورد پیشرو است.  $\|z\|_\sigma$  در همه جا مشتق دارد به جز  $\|z\| = 0$ . برای حل این مساله  $\|z\|_\sigma$  به صورت

$$\Psi_a (\|z\|_\sigma) \\ = \int_{\|d\|_\sigma}^{\|z\|_\sigma} a_{ij}(s) \phi(s - \|d\|_\sigma) d_s \phi(\|z\|_\sigma) \\ = \frac{1}{2} \left[ (a + b) \frac{(\|z\|_\sigma + c)}{\sqrt{1 + ((\|z\|_\sigma) + c)^2}} + (a \right. \\ \left. \right] \quad (8)$$

تعریف می‌شود که در آن  $a, b, c, d$  اعداد عادی هستند و  $A(q) = (a_{ij}(q))$  ماتریس همسایه است.

الگوریتم کنترل فلاکینگ الفتی صابر تأثیر رهبر مجازی را اضافه می‌کند، اما در آن روش رهبر مجازی منطبق می‌شود. در این الگوریتم، اطلاعات سرعت و مکان رهبر مجازی توسط همه عوامل قابل درک است و الگوریتم تنها می‌تواند هر عامل را با سرعت

و گروه پهپاد از رهبر مجازی پیروی کند. تابع هموارسازی را تعریف می‌کنیم.

$$\rho(x) = \left( \frac{r + \delta}{2r + \delta} \right) \left( 1 - \frac{x - r}{\|x - r\| + \delta} \right) \quad (۴)$$

تابع هموارسازی برای ساختن ماتریس هموارسازی توپولوژی ارتباط استفاده می‌شود بطوریکه در ماتریس همسایگی داریم  $A = [a_{ij}]$  که در آن عناصر در ماتریس به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$a_{ij} \begin{cases} \rho(\|q_{ij}\|) \in [0,1] & j \neq i \\ 0 & j = i \end{cases} \quad (۵)$$

وقتی فاصله بین پهپادها بیشتر از شعاع ارتباطی  $r$  باشد، هیچ رابطه ارتباطی بین پهپادها وجود ندارد. از آنجایی که شعاع ارتباطی پهپاد یکسان است، ماتریس مجاورت هموار ماتریس متقارن است. از ایده مرجع (۲۶) استفاده می‌کنیم تا ابتدا گره سطح را پیدا کرده سپس طبق این مدل شعاع ارتباطی هر گره پهپاد را محاسبه شود. شعاع دایره ارتباط مجازی را به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$r_j = \min(r_{jk}) + r_{j-1}$$

### بهبود الگوریتم الفتی صابر

هنگامی که سرعت رهبر مجازی ثابت باشد، همه عوامل دارای اطلاعات راهنما به سرعت رهبر مجازی همگرا می‌شوند. الگوریتم کنترل کلاسیک فقط شامل مقدار بازخورد سرعت رهبر مجازی است، همانطور که اطلاعات سرعت رهبر مجازی را می‌دانیم. شرط همگرایی الگوریتم این است که گراف همسایگی همیشه متصل باشد. بدیهی است که چنین شرایطی در واقعیت امکان پذیر نیست. بدون اطلاعات مکان رهبر مجازی، الگوریتم کنترل فلاکینگ نمی‌تواند همگرایی را در هر توپولوژی سوئیچینگ<sup>۱۱</sup> حفظ کند. بنابراین، یک الگوریتم کنترل فلاکینگ

بهبود یافته پیشنهاد شده است تا همه عوامل سرعت رهبر مجازی را به دقت ردیابی کنند.

تفاوت بین مکان و سرعت عامل و مکان و سرعت رهبر مجازی به صورت  $\tilde{p}_i = p_i - p_r$  و  $\tilde{q}_i = q_i - q_r$  و سپس

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{q}}_i &= \dot{\tilde{p}}_i \\ \dot{\tilde{q}}_i &= \dot{\tilde{p}}_i = u_i - f_r(q_r, p_r) \dots i = 1, 2, \dots, N \\ \tilde{v}_i &= \sum_{j=1, j \neq i}^N \psi_a(\|\tilde{q}_{ij}\|_\sigma) \\ &= \sum_{j \neq -1, j \neq i} \psi_a(\|r\|_\sigma) + \sum_{j \in N_f(t)} \psi_a(\|\tilde{q}_{ij}\|_\sigma) \end{aligned} \quad (۶)$$

با کنترل ورودی و معادله انرژی الگوریتم کلاسیک معادلات زیر وجود دارد:

$$\begin{aligned} \ddot{u}_i &= - \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\tilde{q}_i} \psi_a(\|\tilde{q}_{ij}\|_\sigma) \\ &- \sum_{j \in N_1(u)} a_{ij}(t)(p_i -) - [c_1 q_i + c_2 p_f] \end{aligned} \quad (۷)$$

که

$$\begin{aligned} U_i &= \sum_{j=1, j \neq i}^N \psi_a(\|\tilde{q}_{ij}\|_\sigma) + c_1 q_i^T q_i \\ &= v_i + c_1 q_i^T q_i \end{aligned} \quad (۱۷)$$

به دلیل تقارن تابع پتانسیل  $\psi_a$  و ماتریس همسایه  $A(q)$

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \dot{U}_i = \sum_{i=1}^N (\tilde{p}_i^T \nabla_{\tilde{p}_i} \tilde{v}_i + c_1 q_i^T \dot{q}_i) \quad (۱۸)$$

<sup>۱۱</sup> switching topology

حرکت محلی توسط محاسبات تکراری برای محاسبه موقعیت هدف به روز می شود،  $X_i$  تنظیم شده است تا حالت حرکت گره واحد را نشان دهد:

$$X_i(k) = \begin{bmatrix} x_i(k) \\ v_i(k) \end{bmatrix} \quad (۲۰)$$

چنین معادله ای برای به دست آوردن معادله محاسباتی تکرار حالت گره گسسته می شود:

$$\begin{aligned} X_i(k+1) &= \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i(k) \\ v_i(k) \end{bmatrix} \\ X_i(k+1) &= \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i(k) \\ v_i(k) \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} t(T-t/2) \\ t \end{bmatrix} F_i(k)/m_i \end{aligned} \quad (۲۱)$$

که در آن  $T$  طول زمانی هر مرحله است،  $F_i(k)$  ورودی کنترل گره  $i$  در زمان  $k$ ، و  $t$  زمان عمل ورودی کنترل است. از طریق این معادله، می توانیم وضعیت حرکت لحظه بعدی را از اطلاعات وضعیت حرکت فعلی محاسبه کنیم. با توجه به معادله به روز رسانی حالت حرکت، در هر شکاف  $T$ ، گره ابتدا یک حرکت شتاب یکنواخت  $T$  ثانیه انجام می دهد. هنگامی که سرعت به حد بالای سرعت گره می رسد، گره حرکت شتاب را متوقف می کند و در زمان باقیمانده تا پایان فرآیند حرکت یک حرکت خط مستقیم یکنواخت انجام می دهد.

### مثال شبیه سازی

یک سیستم چند عاملی متشکل از ۱۶ عامل در فضای دوبعدی در نظر گرفته شده و وضعیت توزیع اولیه آن داده می شود. مکان و زاویه جهت عامل هوشمند به صورت تصادفی در محدوده  $[0 \times 70.0 \times 70.0]$  و با سرعت  $v \in [1.2]$  می باشد. محل اولیه رهبر مجازی  $q_\gamma(0) = [20.20]$  و سرعت آن  $p_\gamma(0) = 2$  در نظر گرفته شده است. شعاع ادراک  $R = 10$  و فاصله مورد انتظار  $d = 7$  و ضرایب فیدبک  $c_1 = 0.2$  و  $c_2 = 0.1$  می باشد. بر اساس مدل کلاسیک کنترل فلاک با رهبر مجازی، در اینجا تاثیر رهبر مجازی بر کنترل سیستم چند عاملی در سرعت های مختلف بررسی می شود. شکل ۲ روند

که  $U_i = dU_i/dt$  بنابراین داریم:

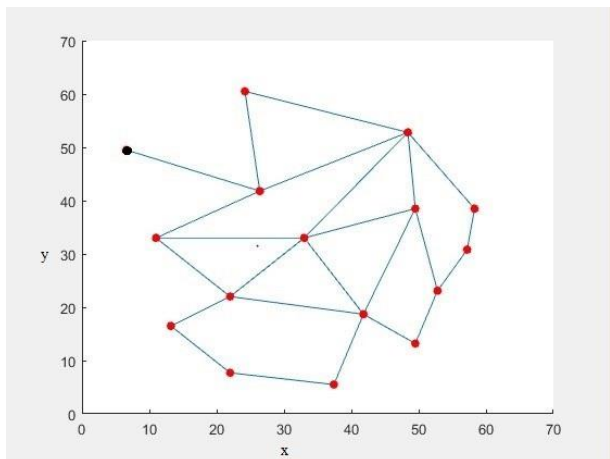
$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \dot{U}_i + \sum_{i=1}^N \dot{p}_i^T \dot{p}_i \\ &= -\dot{p}_i^T [(L(t) + c_2 I_N) \\ &\quad \otimes I_N] \beta \end{aligned} \quad (۱۹)$$

از آنجایی که  $L(t)$  ماتریس نیمه معین مثبت است،  $Q \leq 0$  یعنی  $Q(t)$  یک تابع غیرافزاینده است. برای هر زمان  $t$ ،  $Q(t) \leq Q_0$  همچنین می دانیم که برای هر عامل هوشمند  $i$ ،  $c_1 \tilde{q}_i^T \tilde{q}_i \leq 2Q_0$  بنابراین فاصله هر عامل اطلاعاتی و رهبر مجازی بیش از  $\sqrt{2Q_0/c_1}$  نخواهد بود. در نتیجه الگوریتم فلاکینگ بهبود یافته است.

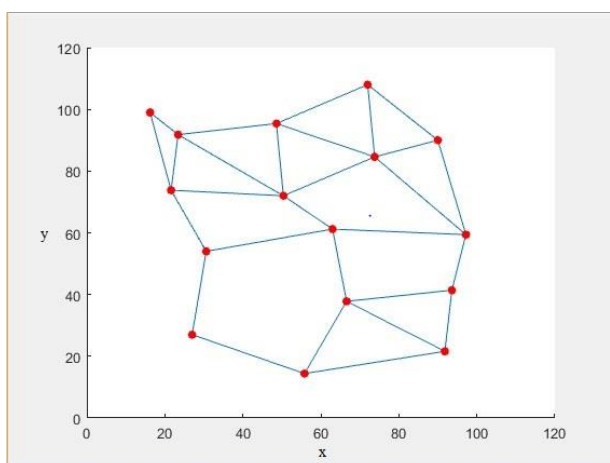
$$\begin{aligned} u_i &= - \sum_{j \in N_i(t)} \nabla_{\tilde{q}_i} \psi_u (\|q_i - q_j\|_\sigma) \\ &- \sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t) (p_f - p_j) \\ &+ f_\gamma(q_\gamma, p_\gamma) + c_1 (q_\gamma - q_f) + c_2 (p_\gamma - p_i) \end{aligned} \quad (۸)$$

### کنترل فاصله پهپادها از یکدیگر

در یک سیستم چند پهپاد، هر گره پهپاد دارای انرژی محدود است و زمان سفر و پرواز نمی تواند خیلی طولانی باشد. بنابراین، مسائل کلیدی که در فرآیند باید در نظر گرفته شود، رسیدن به موقعیت مورد نظر محدود شده توسط حلقه ارتباط مجازی، کاهش مصرف انرژی و افزایش زمان استقامت است. بر اساس تابع متحرک مرجع، یک مدل جدید برای بدست آوردن موقعیت مورد نظر پهپاد طراحی شده است که برای سیستم های چند پهپاد با انرژی محدود مناسب تر است. چنین عملکردی تضمین می کند که گره پهپاد می تواند به سمت موقعیت مورد نظر حرکت کند، شرایط محدود حلقه ارتباطی را برآورده می کند و اطمینان می دهد که پهپادها در فرآیند حرکت با هم برخورد نمی کند. بنابراین، ما تابع حرکت را دوباره تعریف می کنیم و یک مدل جدید برای بدست آوردن موقعیت مورد نظر پهپاد طراحی می کنیم. فرض کنید  $x_i$ ،  $v_i$ ،  $m_i$ ،  $F_i$  بردارهای موقعیت، سرعت، جرم و ورودی کنترل هستند. از آنجایی که اطلاعات وضعیت



شکل ۲ (ب).  $t=60$



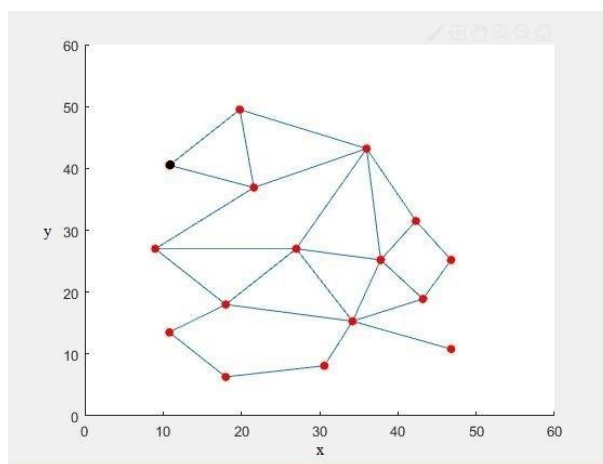
شکل ۲ (پ).  $t=120$

شکل ۲. شکل تکامل سیستم چند عاملی با تغییر نرخ رهبر مجازی

شکل ۳ نموداری از رابطه بین سرعت بهینه رهبر مجازی و اتصال جبری ساختار گراف مربوط به توپولوژی سیستم چند عاملی است که توسط الگوریتم بهینه سازی در [۰.۶] به دست آمده است. شکل ۳ (آ) و (ب) منحنی های تکامل اتصال جبری و روند تکامل نرخ سرعت رهبر مجازی هستند. مشاهده می شود که در ابتدا با افزایش سرعت رهبر مجازی، اتصال جبری تا حدی افزایش می یابد. با این حال، با افزایش سرعت رهبر مجازی، اتصال شروع به کاهش می کند و رهبران مجازی تمایل دارند از عامل مشترک سیستم های جدا شوند. شکل ۳ (پ) تفاوت بین

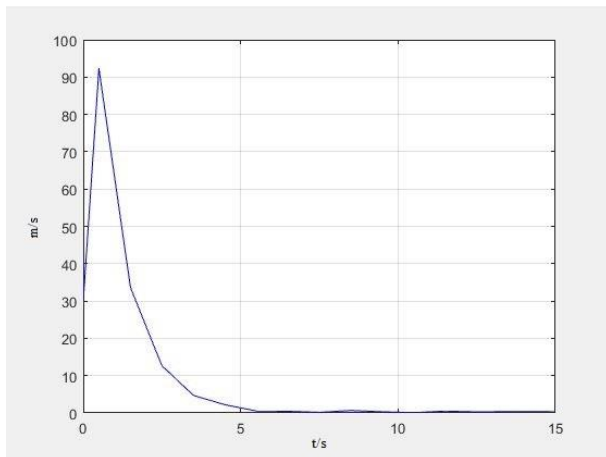
تکامل سیستم چند عاملی را در زمانی که نرخ رهبر مجازی ۰.۵ باشد نشان می دهد.

در ابتدا، بر اساس مدل بهبود یافته کنترل فلاک الفتی-صابر، تأثیر رهبر مجازی بر کنترل فلاک سیستم چند عاملی مورد مطالعه قرار می گیرد. همانطور که از این شکل مشاهده می شود، زمانی که سرعت رهبر مجازی ۵ باشد، رهبر به سرعت از سایر عوامل دور می شود. علاوه بر این، رهبر شروع به جدا شدن از محدوده مشترک نزدیک ترین عامل مشترک به آن، قبل و بعد از موقعیت نشان داده شده در شکل ۲ (ب) می کند (رهبر با رنگ مشکی در شکل مشخص شده است). رهبر مجازی دیگر نقش هدایت کننده ای برای عامل مشترک بازی نمی کند، یعنی الگوریتم کنترل نقش خود را از دست می دهد. در نهایت، تحت تأثیر دو مورد اول الگوریتم کنترل، یک ساختار توپولوژی شبکه  $\alpha$  پایدار مانند مدل الفتی می تواند شکل بگیرد، همانطور که در شکل ۲ (پ) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است اطلاعات وضعیت رهبر مجازی نقش مهمی در تنظیم کنترل دسته جمعی سیستم چند عاملی ایفا می کند.



شکل ۲ (آ).  $t=30$





(پ). تفاوت بین موقعیت و سرعت مرکز گروه پهپاد

و رهبر مجازی زمانی که سرعت رهبر مجازی ۲.۵ متر بر ثانیه است.

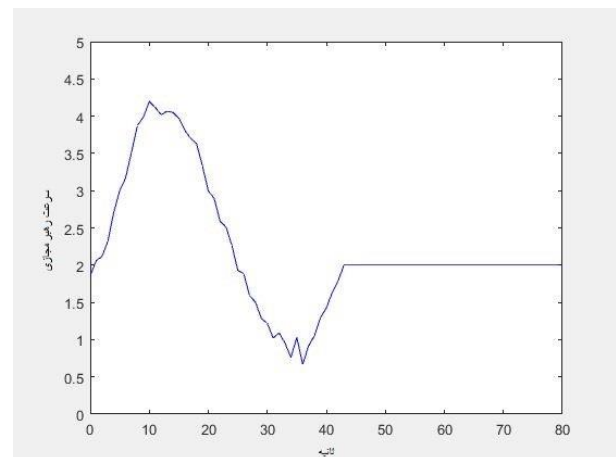
شکل ۳. شکل نمودار تکامل نرخ رهبر مجازی و اتصال جبری.

#### تست عملکرد الگوریتم

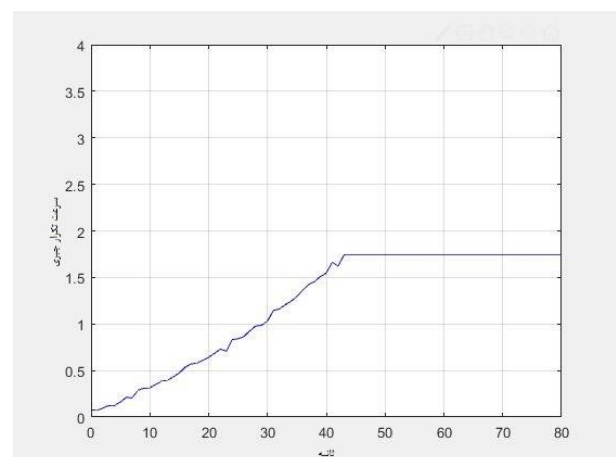
پروتکل مسیریابی وضعیت پیوند بهینه شده<sup>۱۲</sup> یک پروتکل مسیریابی جدولی نقطه به نقطه در شبکه ادهاک موبایل استفاده می‌شود که تمام مسیرهای ارتباطی بین گره‌های همسایه مشخص می‌شود و در سرتاسر شبکه پخش می‌شود و به عنوان پروتکل های شبیه سازی در لایه شبکه استفاده می‌شود. تأثیر کنترل شکل‌گیری این روش بر عملکرد انتقال داده توسط شاخص تأخیر انتقال شبکه بررسی می‌شود. با در نظر گرفتن تعداد گره‌های پهپاد به عنوان یک متغیر، شاخصی که بیشترین تاثیر را در ارتباط چند پهپاد دارد، یعنی میانگین تأخیر انتقال شبکه به عنوان آیتم های مقایسه ای در نظر گرفته می‌شود. محاسبه میانگین تأخیر انتقال شبکه به صورت زیر نشان داده شده است:

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D(i)$$

موقعیت و سرعت مرکز گروه پهپاد و هدایت‌کننده مجازی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که موقعیت و سرعت مرکز گروه پهپاد به موقعیت و سرعت رهبر مجازی در طول پرواز تمایل دارد. سپس سرعت بهینه رهبر مجازی ۲.۵ متر بر ثانیه تعیین می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که وقتی سرعت رهبر مجازی با توجه به حالت همسایه تنظیم می‌شود، به علت متصل نگه داشتن سیستم، سرعت رهبر مجازی به طور مداوم از طریق تابع تناسب ساخته شده بهینه می‌شود، به طوری که اتصال جبری این سیستم در دوره اول و میانی ارزش بهتری پیدا می‌کند و سرعت جمع شدن سیستم چند عاملی تا حدی بهبود یابد.

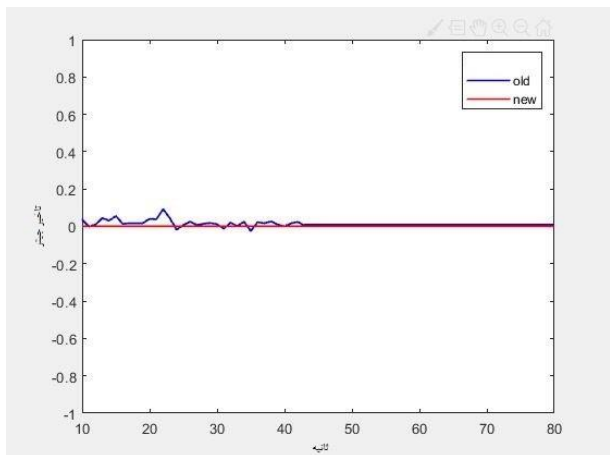


(آ). نمودار تکامل اتصال جبری.



(ب). نمودار تکامل نرخ رهبر مجازی.

<sup>۱۲</sup> Optimized link state routing



شکل ۵. مقایسه تاخیر جیتر الگوریتم ها.

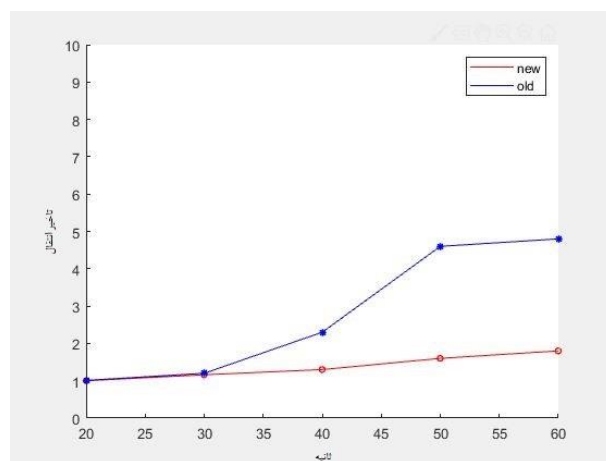
	الگوریتم قدیمی	الگوریتم جدید	درصد بهبود
میانگین تاخیر انتقال در ۲۰ ثانیه ابتدایی	۱	۱	٪۰
میانگین تاخیر انتقال در ۲۰ ثانیه دوم	۱٫۴	۱٫۱	٪۲۷
میانگین تاخیر انتقال در ۲۰ ثانیه سوم	۴٫۲	۱٫۶	٪۱۶۵
میانگین تاخیر جیتر در ۵۰ ثانیه اول	۰٫۰۲	تقریبا صفر	-
میانگین تاخیر جیتر از ۵۰ ثانیه به بعد	تقریبا صفر	تقریبا صفر	-

جدول ۵-۱. مقایسه تاخیر انتقال و تاخیر جیتر در دو الگوریتم قدیمی و جدید.

که در آن  $D(i) = RT(i) - ST(i)$  نشان دهنده تاخیر ارسال گروه  $i$  ام است.  $RT(i)$  نشان دهنده زمان دریافت و  $ST(i)$  نشان دهنده زمان ارسال گروه  $i$  ام است.

شکل ۴ تاخیر انتقال را با دو پروتکل شبکه متفاوت و تعداد پهپادهای مختلف نشان می دهد. با مقایسه دو پروتکل مسیریابی، واضح است که روش این مقاله دارای مزایایی نسبت به روش قدیمی است. با افزایش تعداد پهپادها، میزان افزایش تاخیر روش در این مقاله کمتر است. همچنین تفاوت تاخیر انتقال با استفاده از دو پروتکل شبکه در شکل ۵ ارایه شده است. می توان نتیجه گرفت که در کل فرآیند، تفاوت در تاخیر (جیتر تاخیری) این روش آشکار نیست، در حالی که در فاصله زمانی ۰ تا ۴۵، روش قدیمی دارای لرزش تاخیر آشکار است. میانگین تاخیر و تفاوت در تأخیر دو شاخص نشان می دهد که روش پیشنهادی در این مقاله باعث می شود ارتباط لحظه ای بین پهپادها بهتر و تبادل اطلاعات بین گروه های پهپاد سریعتر شود. نتایج این شبیه سازی در جدول ۵-۱ بطور کامل مشخص است.

\*



شکل ۴. مقایسه تاخیر انتقال الگوریتم ها.

## نتیجه‌گیری

با توسعه فناوری رایانه و فناوری ارتباطات بی‌سیم، این امکان وجود دارد که یک سیستم ربات واحد با یک سیستم انبوه متشکل از چندین ربات جایگزین شود. سیستم گروهی پهپاد دارای مزایای ادراک محیطی قوی، راندمان بالا و استحکام قوی است که درک آن‌ها توسط یک ربات دشوار است و کنترل استراتژی ارتباطات امنیتی پهپادها به یکی از مطالب مهم تحقیقاتی در زمینه چندعاملی تبدیل شده است. این مقاله به بررسی امنیت و ثبات ارتباطات گروهی پهپادها می‌پردازد. بر اساس مدل‌های گروه موجود، الگوریتم فلاک بهبود یافته و تابع حرکت موقعیت هدف جدید برای افزایش پایداری سیستم و بهبود اثربخشی و همگرایی الگوریتم استفاده می‌شود. با این حال، بیشتر تحقیقات در این مقاله بر روی کنترل بهینه توپولوژی و تشکیل شبکه چندعاملی است. اگرچه با در نظر گرفتن محدوده ارتباطی توان ارتباطی مختلف برای پهپادها در موقعیت‌های مختلف محیطی، یک مدل کنترل توان مبتنی بر موقعیت نیز پیشنهاد شده است. با توجه به پیچیدگی ساختار شبکه، کنترل توان شبکه ادھاک سیار شامل چندین روش بهینه‌سازی سطح شبکه است. در کارهای آینده، می‌توان روش‌های بیشتری مانند یادگیری ماشین برای مطالعه الگوریتم کنترل توان شبکه را در نظر گرفت.

## منابع و مراجع

- [5] L. Jin, S. Li, X. Luo, "Neural dynamics for cooperative control of redundant robot manipulators," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, PP (99), 1-1, 2018.
- [6] Z. Lin, L. Wang, Z. Han and M. Fu, "Distributed formation control of multi-agent systems using complex Laplacian," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 59, no. 7, pp. 1765-1777, Jul. 2014.
- [7] W. Ren and E. Atkins, "Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange," *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 17, pp. 1002-1033, Jul. 2007.
- [8] K. D. Do, "Bounded controllers for formation stabilization of mobile agents with limited sensing ranges," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 3, pp. 569-576, Mar. 2007.
- [9] D. H. Kim, H. Wang and S. Shin, "Decentralized control of autonomous swarm systems using artificial potential functions: Analytical design guidelines," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 45, no. 4, pp. 369-394, 2006.
- [10] J. Ghommam, H. Mehrjerdi and M. Saad, "Robust formation control without velocity measurement of the leader robot," *Control Eng. Pract.*, vol. 21, no. 8, pp. 1143-1156, 2013.
- [11] T. Liu and Z.-P. Jiang, "Distributed formation control of nonholonomic mobile robots without global position measurements," *Automatica*, vol. 49, no. 2, pp. 592-600, Feb. 2013.
- [12] R. Olfati-Saber, "Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory." *IEEE Transactions on automatic control*, 51.3, 401-420, 2006.
- [13] J. Gangshan, Y. Zheng and L. Wang. "Flocking of multi-agent systems with multiple groups." *International Journal of Control* 87.12 (2014): 2573-2582
- [14] Su, Housheng, Xiaofan Wang and Wen Yang. "Flocking in multi-agent systems with multiple virtual leaders." *Asian Journal of control*, 10.2 (2008), 238-245.
- [15] H. Shi, L. Wang and T. Chu. "Flocking of multi-agent systems with a dynamic virtual leader." *International Journal of Control* 82.1, 43-58, 2009.
- [16] S.-ho, Ha and S.-d Chi. "Multi-agent based design of autonomous UAVs for both flocking and formation flight." *Journal of Advanced Navigation Technology*, 21.6, 521-528, 2017.
- [1] S. Keshmiri and S. Payandeh, "A centralized framework to multi-robots formation control: Theory and application" in *Collaborative Agents—Research and Development*, Berlin, Germany: Springer, vol. 6066, pp. 85-98, 2011
- [2] G. Antonelli, F. Arrichiello, F. Caccavale and A. Marino, "Decentralized time-varying formation control for multi-robot systems", *Int. J. Robot. Res.*, vol. 33, no. 7, pp. 1029-1043, 2014.
- [3] A. Yang, W. Naeem, G. W. Irwin and K. Li, "Stability analysis and implementation of a decentralized formation control strategy for unmanned vehicles," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 22, no. 2, pp. 706-720, Mar. 2014.
- [4] S. Li, J. He, Y. Li, et al. "Distributed recurrent neural networks for cooperative control of manipulators: A Game-Theoretic Perspective," *IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems*, PP (99), 1-12, 2016.

- [17] Joelianto, Endra, and Albert Sagala. "Swarm tracking control for flocking of a multi-agent system." *IEEE Conference on Control, Systems & Industrial Informatics*. IEEE, 2012.
- [18] Fusaomi Nagata, Takahiro Yamashiro and Keigo Watanabe, "Cooperative swarm control for multiple mobile robots using only information from PSD sensors", *Artif. Life Robot*. 16(1) (2016) 116-120.
- [19] Zhao, Weiwei, et al. "Flocking control of fixed-wing UAVs with cooperative obstacle avoidance capability." *IEEE Access* 7 (2019), 17798-17808.
- [20] Zhao, Taifei, et al. "Flocking of UAV formation with wireless ultraviolet communication." *Wireless Personal Communications* 114.3, 2551-2568, 2020.
- [21] Liu, Xiyuan, and Li Qiu. "Bird flocking inspired control strategy for multi-UAV collective motion." *ArXiv preprint arXiv:1912.00168*, 2019.
- [22] Saif, Osamah, Isabelle Fantoni and Arturo Zavala-Río. "Flocking of multiple unmanned aerial vehicles by lqr control." *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, 2014.
- [23] Yan, Peng, et al. "Flocking control of uav swarms with deep reinforcement learning approach." *2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS)*. IEEE, 2020.
- [24] Liu, Chao, et al. "Leader-following flocking for unmanned aerial vehicle swarm with distributed topology control." *Science China Information Sciences* 63.4, 1-14, 2020.
- [25] Huihui Ji, He Zhang, Baotong Cui, "Containment analysis of Markov jump swarm systems with stationary distribution", *IET Control Theory Appl.* 11 (7) (2017) 901-907.
- [26] Q. Wang, A. Zhang and Z. J. Song, "Simulation study on improved discrete particle swarm optimization algorithm for multiple UAV cooperation task assignment", *J. Syst. Simul.* 3(1) (2014) 39-45.