

هدایت و کنترل توزیع شده شبکه پهپادها

جعفر خلیل پور^{۱*}، محمد ویسی^۲ و فرشاد رحیمی^۳

۱ و ۲- دانشیار و مربی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیاء(ص)، تهران ۳- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

(دریافت: ۹۷/۰۹/۲۴، پذیرش: ۹۸/۰۳/۲۸)

چکیده

توانایی کنترل و هدایت پهپادها، به عنوان یکی از ابزارهای مدرن فناوری در ارتباط با سامانه‌های هوافضایی، به اولویت مهمی در حوزه پدافند هوایی هر کشوری مبدل شده است. در این مقاله، گروهی از پهپادهای شبکه شده که با هماهنگی یکدیگر اهداف مشخصی را دنبال می‌کنند، در نظر گرفته شده‌اند. پهپادها در حین مأموریت با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند و به تبادل اطلاعات مهمی مانند سرعت و مکان خود با اعضای دیگر موجود در شبکه می‌پردازند. کنترل کننده طراحی شده برای این منظور، به صورت توزیع شده طراحی شده است. با توجه به ماهیت شبکه بودن سامانه، برای پیاده کردن ساختار شبکه و همچنین کاهش حجم محاسبات از الگوریتم بهینه‌سازی توزیع شده و همچنین از کنترل پیش‌بین استفاده شده است. در اینجا چالش‌هایی نظیر حفظ آرایش مطلوب، تأخیر ارتباطی در شبکه و مصرف بهینه انرژی، برای رسیدن به هدف در حین عملیات مطرح می‌شوند، که لازم است کنترل کننده طراحی شده با وجود موارد ذکر شده عملکرد مطلوبی داشته باشد. در نهایت برای بررسی و نشان دادن عملکرد مطلوب کنترل کننده طراحی شده، شبیه‌سازی‌هایی در نرم‌افزار متلب انجام می‌شوند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که روش پیشنهادی با وجود چالش‌های ذکر شده در سامانه‌های شبکه شده، نرخ همگرایی و مقدار قابل تحمل تأخیر زمانی بهتری نسبت به روش‌های مشابه قبلی دارد.

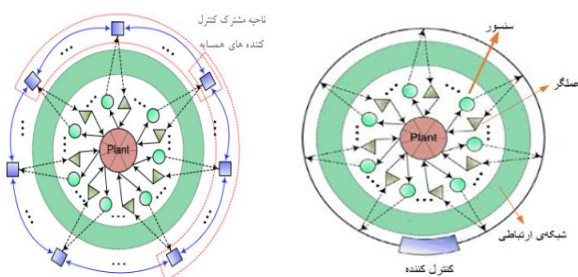
کلیدواژه‌ها: فرماندهی و کنترل توزیع شده، سامانه‌های ارتباطی، پهپادهای شبکه شده، تأخیر ارتباطی، بهینه‌سازی

۱. مقدمه

افزایش دقت و احتمال موفقیت عملیات از جمله موارد مهمی هستند که سامانه‌های چندعامله در ماهیت رفتاری خود دارند. پیاده‌سازی و استفاده از چندین عامل در یک سامانه می‌تواند در کنترل کننده‌های متمرکز^۱ و نامتمرکز^۲ یا توزیع شده^۳ اعمال شوند [۳].

پرداختن به مطالعه‌ای جامع و معرفی کردن ساختارهای کاربردی برای فرماندهی و کنترل پرنده‌های هدایت شونده برای انجام عملیات‌های پیچیده، در سال‌های اخیر مورد توجه شرکت‌های نظامی، محققان دانشگاهی و صنعتی قرار گرفته است [۱]. با نگاهی به میدان نبردهای اخیر، تصویری از استفاده و به کارگیری ابزارهای نوین دیده می‌شود که این ابزارها، قدرت و عملکرد بسیار پیشرفته‌تری نسبت به جنگ‌افزارهای اواسط قرن بیستم مانند جنگ جهانی دوم دارند. این ابزارها و فناوری‌ها، می‌توانند اطلاعات دقیقی از وضعیت نیروها و آسیب‌دیدگان، تجهیزات و اوضاع جو و زمین منطقه عملیات را ارائه دهند. همچنین امکان تبادل اطلاعات در زمان مناسب، هدایت و کنترل نیروها و تجهیزات در داخل و خارج مناطق بحرانی را بهتر فراهم می‌کنند [۲].

در سال‌های اخیر سامانه‌های شبکه شده که دارای چندین عامل هستند به خاطر کاربردهای فراوان و مزیت‌های مهمی که این گونه سامانه‌ها دارند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. مزیت‌هایی نظیر افزایش انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان سامانه،



شکل (الف) ساختار متمرکز (ب) ساختار توزیع شده

شکل (۱): ساختارهای کنترلی متمرکز و توزیع شده

شکل (۱-الف) بیانگر ساختار کنترل کننده متمرکز می‌باشد که از اجزایی مانند بخش کنترل کننده، شبکه ارتباطی، عملگر،

¹ Centralized

² Decentralized

³ Distributed

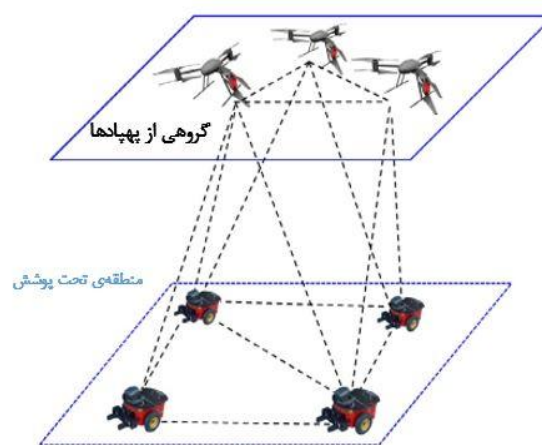
ارمغان آورده می‌شود. در بیشتر منابع، روش‌های نوین ارائه شده برای ساختار هدایت پهپادها، به صورت متمرکز معرفی شده است. در منابع منتشر شده در سال‌های اخیر، طراحی کنترل کننده برای گروهی از پهپادهای شبکه شده که به طور هم‌زمان در حین انجام عملیات هستند به ندرت مورد بررسی واقع شده است.

در این بخش به مروری بر ادبیات تحقیق در زمینه کنترل آرایش در حضور تأخیر در شبکه‌های ارتباطی با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندین عامله پرداخته می‌شود. استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی برای مثال در تعیین مکان پایگاه‌ها، اهمیت قابل توجهی در مسائل نظامی دارند [۹]. با بررسی کارهایی که در سال‌های اخیر منتشر شده‌اند می‌توان گفت که موضوع کنترل آرایش در حضور تأخیر با توجه به الگوریتم‌های بهینه‌سازی توزیع شده چندان مورد توجه قرار نگرفته است. در اینجا ابتدا کارهایی که در زمینه بهینه‌سازی توزیع شده ارائه شده‌اند، بررسی خواهد شد و در نهایت به کنترل آرایش بهره‌مند از الگوریتم‌های بهینه‌سازی توزیع شده پرداخته می‌شود.

دسته‌بندی‌های متعددی برای الگوریتم‌های پیشنهاد شده برای بهینه‌سازی توزیع شده، وجود دارد ولی به طور کلی روش‌های بهینه‌سازی توزیع شده را می‌توان در دو دسته مدل‌های مبتنی بر زمان گسسته و زمان پیوسته قرار داد. البته اغلب کارهای ارائه شده برای مدل‌های زمان گسسته انجام شده‌اند. لازم به ذکر است دسته‌بندی رایج دیگری نیز وجود دارد: روش‌های گرادیان مبتنی بر اجماع و روش‌های تجزیه یا دوگانه اولیه^۱. اولین بار ندیک^۲ و ازدگلر^۳ روش اجماع را برای شبکه‌های دینامیکی زمان گسسته توسعه دادند [۱۰] و همین روش را دو سال بعد برای شبکه‌های تصادفی نیز به کار برده‌اند [۱۱]. در روش اجماع، همیشه یک مصالحه بین بهینگی و نرخ همگرایی وجود دارد که رسیدن به همگرایی بهتر، خود یکی از موضوعات مورد توجه بوده است. در مرجع [۱۲] الگوریتم تجزیه دوگانه برای سامانه‌های چندین عامله ارائه شده است. همچنین در مرجع [۱۳] الگوریتم تجزیه دوگانه برای یک مسئله کنترل پیش‌بین توزیع شده در مورد سامانه‌هایی که کوپلینگ دینامیکی دلخواهی دارند ارائه شده است، اما متأسفانه در این مقاله به تأخیر زمانی هنگام تبادل اطلاعات بین عامل‌ها پرداخته نشده است. ترکیب کردن دو روش اجماع و تجزیه در طراحی کنترل کننده می‌تواند عملکرد سامانه شبکه را خیلی بهبود ببخشد که این کار در رساله درگاه^۴ در سال ۲۰۱۴ انجام شده است [۱۴].

معادلات سامانه و غیره تشکیل شده است. در ساختار توزیع شده همانند شکل (۱-ب) کنترل کننده برای کل بخش‌های مختلف سامانه به صورت توزیع شده و مجزا نصب شده است. استفاده از چند سامانه مجزا در حالت توزیع شده، علاوه بر کاهش بار محاسباتی سامانه، پیاده‌سازی کنترل کننده را ساده‌تر می‌کند. یکی از مهم‌ترین مزایای ساختار توزیع شده بدین گونه است که زمانی که برای قسمتی از سامانه مشکلی پیش بیاید برخلاف ساختار متمرکز کل سامانه از کار نمی‌افتد و این امر در کل قابلیت اطمینان سامانه را افزایش می‌دهد [۴]. هر کدام از ساختارهای توزیع شده یا متمرکز می‌توانند در سامانه‌های کنترلی نظیر کنترل آرایش مورد استفاده قرار گیرند [۵].

در سال‌های اخیر کنترل آرایش به دلیل کاربردهای فراوان در سامانه‌های عملی توجه زیادی را به خود جذب کرده است [۶]. با بررسی کارهای انجام شده در مسئله کنترل آرایش، مشهود است که کنترل آرایش هنوز با چالش‌های بسیار زیادی مواجه است [۷]. برای مثال در شکل (۲) مثالی از کنترل آرایش و کاربرد عملیاتی که گروهی از پهپادهای شبکه شده می‌توانند داشته باشند، بیان شده است.



شکل (۲): آرایش حرکت گروهی از پهپادهای شبکه شده

چالش‌هایی مانند: وجود تأخیر در تبادل اطلاعات بین عامل‌ها، از بین رفتن داده‌ها حین تبادل اطلاعات و تغییر توپولوژی ارتباطی در گروه از مهم‌ترین چالش‌های مطرح در کنترل آرایش در یک سامانه چندعامله است [۸].

وقتی که فرماندهی و کنترل ارتشی از پهپادها از یکپارچگی لازم برخوردار بوده و امکان تبادل اطلاعات بین آنها به خوبی برقرار باشد و همچنین هیچ کدام از پهپادها به عنوان فرمانده مرکزی در نظر گرفته نشود، در چنین شرایطی مزیت‌هایی نظیر: سرعت انجام عملیات، قابلیت اطمینان بالای سامانه، انسجام و هماهنگی برای مأموریت پهپادها تحت نظارت سازمان نظامی به

¹ Primal-dual

² Nedic

³ Ozdaglar

⁴ Droge

لیاپانوف شرایط پایداری را در حضور تأخیر به دست آورده‌اند. آن‌طور که نویسندگان مقاله ادعا کرده‌اند، اولین کار انجام شده برای کنترل آرایش سامانه‌ها در حضور تأخیر است. متأسفانه در این مقاله، موضوعاتی مانند جلوگیری از برخورد بین عامل‌ها و همچنین جلوگیری از برخورد با موانع، در نظر گرفته نشده است و همچنین مبادله اطلاعات بین عامل‌ها به صورت ثابت و دو طرفه در نظر گرفته شده است که نویسندگان در نظر گرفتن این مسائل را به عنوان پیشنهادهایی برای کارهای آینده خود مطرح کرده‌اند.

در سال ۲۰۱۲، کنترل آرایش سفینه‌های فضایی دارای دینامیک گرانو، با راهبرد رهبر-پیرو مورد بررسی قرار گرفته است [۲۴]، در این مقاله دینامیک موقعیت نسبی عامل‌های پیرو نسبت به رهبر گروه را در نظر گرفته و با فرض اینکه در دینامیک سامانه عدم قطعیت وجود دارد از کنترل تطبیقی استفاده کرده‌اند و در نهایت شرایط پایداری با استفاده از تابع لیاپانوف به دست آمده است. دینامیک نسبی عامل‌ها و رهبر گروه به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$\begin{aligned} \dot{p}_i &= v_i \\ m_{f_i} &= F_{di} + F_{ai} - C_{ii}(\omega_0)v_i - D_{ii}(\omega_0, \dot{\omega}_0, r_f)p_i \\ &\quad - n_{ii}(r_i, r_f) \end{aligned} \quad (1)$$

v_i و p_i به ترتیب موقعیت و سرعت عامل i ام را نسبت به رهبر گروه نشان می‌دهد. در این رابطه F_{di} نیروهای اغتشاش را نمایش می‌دهد و F_{ai} قانون کنترلی عامل i ام است که به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$F_{ai} = f_{ai} - \frac{m_{fi}}{m_i} f_{al}$$

که f_{ai} و f_{al} به ترتیب قانون کنترلی مربوط به عامل i ام و رهبر گروه است. قانون کنترلی عامل i ام به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{aligned} f_{ai} &= W_i \hat{g}_i - k_{pi} e_{pi} - k_{di} z_i - \sum_{j=1}^n k_{ij}^p [e_{pi} - e_{pj}(t - T_{ij})] \\ &\quad - \sum_{j=1}^n k_{ij}^d [z_i - z_j(t - T_{ij})] \end{aligned} \quad (2)$$

تأخیر در دریافت اطلاعات مربوط به خطای موقعیت عامل‌های دیگر، یعنی e_{pi} قابل مشاهده است. علاوه بر این در معادله (۲)، \hat{g}_i بخشی از قانون کنترلی است که به صورت تطبیقی می‌باشد و عدم قطعیت در دینامیک عامل‌ها را حل و فصل می‌کند و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{g}_i = -\Gamma_i W_i^T (\varepsilon_i e_{pi} + e_{vi} - \varepsilon_i z_i) \quad (3)$$

در سامانه‌های چند عامله، مبادله اطلاعات بین عامل‌ها نقش اساسی در حل مسائل بهینه‌سازی توزیع شده دارد. در عمل، وجود تأخیرهای زمانی در شبکه‌های ارتباطی اجتناب‌ناپذیر است [۱۵]. برای مثال در یک شبکه حسگر بیسیم، حسگرها در منطقه وسیعی در شبکه نصب شده‌اند که با توجه به فاصله بین حسگرها مبادله اطلاعات بین آن‌ها با تأخیر زمانی صورت می‌گیرد [۱۶]. تأخیر زمانی زیاد می‌تواند موجب مشکلاتی نظیر ناپایداری [۱۷]، دوشاخگی^۱ [۱۸] و در نهایت ناکارآمدی سامانه شود؛ بنابراین، طراحی یک سامانه چند عامله که نسبت به وجود تأخیر ارتباطی مقاوم باشد بسیار کاربردی و مهم است. در مرجع [۱۹]، نویسندگان بر اساس روش گرادیان کاهشی، الگوریتمی برای حل مسئله بهینه‌سازی توزیع شده پیشنهاد داده‌اند که در آن تأخیر ارتباطی و تأثیر آن بر نرخ همگرایی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در مرجع [۲۰] الگوریتم تناسبی-انتگرالی مبتنی بر چارچوبی غیرفعال در حضور تأخیر ارتباطی بین عامل‌ها برای مسئله بهینه‌سازی توزیع شده ارائه شده است. نویسندگان مقاله [۲۱] یک سامانه زمان پیوسته چند عامله را برای بهینه‌سازی توزیع شده در حضور تأخیر، گسترش داده‌اند و در نهایت شرایط تحلیل همگرایی مسئله را در فضایی به صورت نامساوی‌های ماتریسی بیان کرده‌اند.

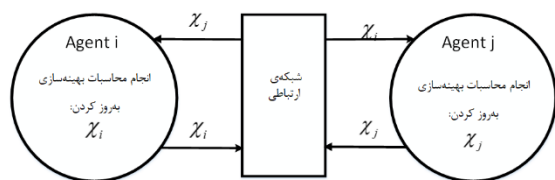
کنترل نحوه حرکت مجموعه‌ای از عامل‌ها با استفاده از کوپلینگ دینامیک هر یک از آن‌ها با یک قانون کنترلی مشترک، به عنوان کنترل آرایش شناخته می‌شود. کنترل آرایش به صورت کلی دو ویژگی باید داشته باشد: الف) حداقل یکی از اعضای گروه نسبت به دیگر اعضا باید حالت از پیش تعریف شده‌ای را دنبال کند. ب) قانون کنترلی متناظر، باید به این عضو وابسته باشد [۲۲]. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، مسأله کنترل آرایش در حضور تأخیر چندان مورد توجه قرار نگرفته و مقالات اندکی در این زمینه منتشر شده است که مهم‌ترین این مقالات به طور خلاصه مرور می‌گردد. اولین کار پژوهشی که به صورت مستقیم مسئله کنترل آرایش را در حضور تأخیر بررسی کرده است توسط طیبی در دانشگاه وسترن اونتاریو^۲ انجام شده است [۲۳]. نویسندگان این مقاله، مسئله کنترل آرایش در حضور تأخیر متغیر با زمان را برای نوع خاصی از سفینه‌های فضایی مورد بررسی قرار داده‌اند. نویسندگان به کمک توابع لیاپانوف-کرازوفسکی^۳، ابتدا در حالتی که بردار حالت به طور کامل در دسترس است، کنترل‌کننده را طراحی کرده‌اند و شرایط پایداری وابسته به تأخیر و مستقل از تأخیر را به دست آورده‌اند. در ادامه، با فرض اینکه اطلاعات مربوط به سرعت عامل‌ها در دسترس نیست، باز هم به کمک تابع

¹ Bifurcation

² Western ontario

³ Lyapunov krasovskii function

استفاده می‌شود. همچنین تأخیر از نوع متغیر با زمان و کران‌دار در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): دیاگرام بلوکی ساختار سامانه

χ_i و χ_j متغیرهای بهینه‌سازی و یا اطلاعاتی هستند که بین پهپادهای i و j مبادله می‌شوند. همان‌طور که از شکل (۳) مشخص است برای هر پهپاد، کنترل‌کننده مجزایی در نظر گرفته شده است. پهپادها اطلاعات به‌روز شده خود را که طبق الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهادی محاسبه می‌شوند، از طریق یک شبکه ارتباطی (توپولوژی ارتباطی) به همسایگان خود می‌فرستند. همچنین از طریق این شبکه ارتباطی اطلاعات مورد نیاز را از همسایگان دریافت می‌کنند.

کنترل پیش‌بین به‌عنوان ابزار کنترلی که توانایی پیش‌بینی رخدادها را آینده و اتخاذ اعمال کنترلی متناسب با آن دارد برای انجام محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد. این خود یکی از مزیت‌های مهم کنترل پیش‌بین نسبت به کنترل‌کننده‌های کلاسیک نظیر PID و LQR است. همچنین کنترل‌کننده‌های پیش‌بین نسبت به تأخیرهای زمانی طولانی و دینامیک پیچیده سامانه‌ها عملکرد مطلوبی دارند.

در ادامه، ساختار مقاله به ترتیب زیر بخش‌بندی می‌گردد: در ابتدای بخش ۲ به استخراج مدل ریاضی پهپادها متناسب با ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی پرداخته می‌شود. سپس اهداف مأموریت در نظر گرفته شده برای پهپادها معرفی می‌شود. در انتهای بخش ۲ نیز عملکرد روش پیشنهادی با شبیه‌سازی‌های انجام شده در محیط نرم‌افزار متلب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در بخش ۳ نوآوری‌ها و مزایای روش پیشنهادی ارائه می‌گردد. در بخش ۴ به جمع‌بندی عملکرد و کارایی کنترل‌کننده پیشنهادی پرداخته می‌شود. در نهایت، در بخش ۵ پیشنهاداتی برای کارهای تحقیقاتی آتی ارائه می‌گردد.

۲. یافته‌های تحقیق، مدل‌سازی و شبیه‌سازی

پهپادی مطابق شکل (۴) در فضای سه‌بعدی حول محورهای XYZ در نظر گرفته می‌شود. چرخش حول محور عمودی که از زمین به سوی آسمان امتداد دارد را گردش یا yaw می‌نامند. همچنین

واضح است که برای محاسبه قانون کنترلی علاوه بر خطای موقعیت، به خطای سرعت عامل‌ها نیز نیاز است و این یکی از ضعف‌های این تحقیق به شمار می‌رود؛ زیرا عامل‌ها باید به تجهیزات اندازه‌گیری سرعت نیز مجهز باشند که این امر، حجم تبادل داده بین عامل‌ها را زیاد خواهد کرد. در این تحقیق از تابع لیاپانوف-کرازوفسکی پیچیده‌ای برای برخورد با تأخیر استفاده شده است و نیز ملاحظات خوبی مانند عدم قطعیت در دینامیک و وجود تأخیر متغیر با زمان در نظر گرفته شده است. همچنین، نامتمرکز بودن کنترل‌کننده یکی دیگر از نقاط قوت این تحقیق است ولی وابستگی قانون کنترلی به دست‌آمده به اطلاعات سرعت عامل‌ها، یکی از نقاط ضعف این تحقیق به حساب می‌آید. علاوه بر این، شرایط کافی متعددی برای طراحی کنترل‌کننده باید برقرار گردد. نکته دیگر اینکه مشتق تأخیر نیز در شرایط پایداری استفاده شده است. در این تحقیق نیز موضوعات مهمی مانند جلوگیری از برخورد عامل‌ها، جلوگیری از برخورد با موانع و تغییر شکل آرایش در طول مسیر در نظر گرفته نشده است. در مرجع [۲۵] مسئله کنترل آرایش پرواز گروهی از پرنده‌های بدون سرنشین در حضور نامعینی پارامترهای سامانه و اغتشاشات خارجی، بدون در نظر گرفتن تأخیر ارتباطی مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین در مرجع [۲۶] رویکردی مبتنی بر کنترل آرایش توزیع شده برای هدایت فرود و بلند شدن پرنده‌های بدون سرنشین، با توجه به تغییر کردن توپولوژی ارتباطی بین پرنده‌ها ارائه شده است.

در این مقاله هدف نویسنده‌گان، طراحی کنترل‌کننده‌ای می‌باشد که با وجود تأخیر در تبادل اطلاعات مابین پهپادها، آرایش مطلوب سامانه شبکه شده در حین حرکت حفظ شود و نهایتاً سامانه به اهداف کنترلی تعریف شده دست یابد. لذا، اهدافی مانند رسیدن به موقعیت خاص و سرعت مطلوب را می‌توان در نظر گرفت. با الهام گرفتن از روش‌های ارائه شده در مراجع [۲۱] و [۲۷] برای حل یک مسئله بهینه‌سازی توزیع شده، در این مقاله روشی نوین مبتنی بر زیرگرایان پیشنهاد داده می‌شود. نوآوری روش پیشنهادی به این ترتیب است که برای هر عامل (در اینجا هر عامل یک پهپاد در نظر گرفته شده است) در انجام محاسبات بهینه‌سازی، عبارت گرایان نسبت به اطلاعات وزن داده شده خود و اطلاعاتی که از همسایه‌ها دریافت می‌کند، محاسبه می‌شود. استفاده از این روش بهینه‌سازی موجب می‌شود سامانه شبکه شده سرعت همگرایی و قدرت تحمل تأخیر بهتری داشته باشد. ساختار سامانه شبکه شده به‌صورت شکل (۳) می‌باشد.

لازم به ذکر است که برای استفاده از الگوریتم پیشنهادی از پهپادهایی که دینامیک آنها قابل تبدیل به فرم انتگرال‌گیر باشد،

$$c_i(t) = [a_{xi}(t) \ a_{yi}(t) \ a_{zi}(t)]^T \quad (5)$$

که در آن، $a_{xi}(t) = (\frac{1}{m_i})(T_i(t) - D_i(t))$ ، با توجه به پارامترهای رابطه (۴) یعنی $\dot{p}_{xi}(t), \dot{p}_{zi}(t), \dot{p}_{yi}(t)$ و جایگذاری $\dot{\psi}_i(t), \dot{V}_i(t)$ و $\dot{\gamma}_i(t)$ به رابطه ساده شده زیر می‌رسیم:

$$\ddot{p}_i(t) = b_i(t)c_i(t) + [0 \ 0 \ -g]^T \quad (6)$$

که در اینجا $b_i(t)$ عبارت است از:

$$b_i(t) = \begin{bmatrix} \cos \gamma_i(t) \cos \psi_i(t) & -\sin \psi_i(t) & -\sin \gamma_i(t) \cos \psi_i(t) \\ \cos \gamma_i(t) \sin \psi_i(t) & \cos \psi_i(t) & -\sin \gamma_i(t) \sin \psi_i(t) \\ \sin \gamma_i(t) & 0 & \cos \gamma_i(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

برای پیاده‌سازی هدفی مانند رسیدن پهپادها به یک منطقه خاص و چرخیدن اطراف آن به صورت هماهنگ با اعضای گروهی از پهپادها، لازم است این خواسته به صورت ریاضی در معادلات دینامیک حرکت پهپادها وارد شود. به این منظور، تبدیل معادلات (۹) انجام شده است. ابتدا برای سادگی کار فرض می‌شود پهپادها در یک ارتفاع مشخص و ثابت در حال حرکت هستند، به عبارت دیگر ابتدا پهپادها به یک ارتفاع مشخص می‌رسند بعد ساختار کنترل کننده برای هدایت پهپادها فعال می‌شود، بنابراین:

$$\begin{aligned} \dot{p}_{xi}(t) &= V_i(t) \cos \psi_i(t) \\ \dot{p}_{yi}(t) &= V_i(t) \sin \psi_i(t) \\ \dot{p}_{zi}(t) &= 0 \\ \dot{V}_i(t) &= \frac{1}{m_i}(T_i(t) - p_i(t)) \\ \dot{\psi}_i(t) &= \frac{a_{yi}(t)}{V_i(t)} = w \end{aligned} \quad (8)$$

با تبدیل ساده زیر می‌توان همه پهپادها را به سمت منطقه مشخص هدایت کرد.

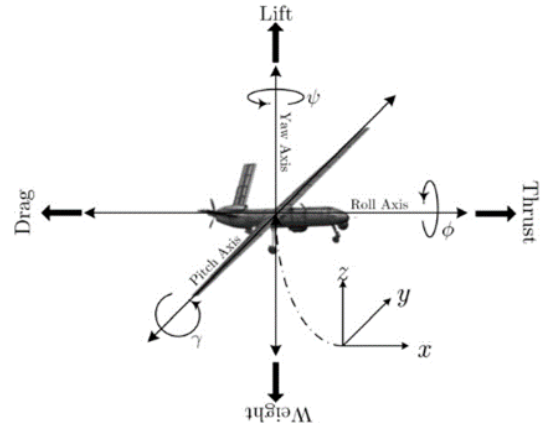
$$\begin{aligned} \dot{p}_i(t) &= v h \\ \dot{h} &= w J h \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن، $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ و $h = [\cos \psi_i(t) \ \sin \psi_i(t)]^T$ هستند. با توجه به مرجع [۲۸] برای رسیدن به یک منطقه دایره‌ای شکل، ورودی کنترل زیر پیشنهاد داده می‌شود:

$$\begin{aligned} u_i &= k_i(x_i, \theta_i) = \theta_i \begin{bmatrix} \gamma_i & \omega_{orb} \\ -\omega_{orb} & \gamma_i \end{bmatrix} \hat{x}_i \\ \gamma_i &= g_{lc}(r^2 - \hat{x}_i^2) \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن، $\hat{x}_i = x_i - c$ ، $c \in R^2$ ، مرکز دایره، $\theta_i \in R$ بهره قابل تنظیم سرعت است که به صورت برخط در طول حرکت تعیین می‌شود. $\omega_{orb} \in R$ فرکانس مطلوب چرخش، $g_{lc} \in R$ بهره‌ای برای همگرایی چرخه حدی و $r \in R$ شعاع چرخش است.

چرخش حول محور طولی که از نوک پهپاد به سمت دم هواپیما امتداد دارد را غلت زدن یا roll و چرخش حول محور عرضی که از انتهای یک بال به انتهای بال مقابل پهپاد مطابق شکل (۴) امتداد دارد را گشتاور یا pitch نامیده می‌شوند. در ادامه، سامانه شبکه شده از چندین پهپاد که اطلاعات مهم را با هم مبادله می‌کنند، معرفی می‌گردد. هر کدام از پهپادها دینامیکی مطابق شکل (۴) دارند.



شکل (۴): پهپاد در محیط سه بعدی

یک سامانه که دارای N پهپاد به صورت شبکه شده است در نظر گرفته شده است. دینامیک هر کدام از عامل‌های i ام به صورت زیر تعریف شده است:

$$\begin{aligned} \dot{p}_{xi}(t) &= V_i(t) \cos \gamma_i(t) \cos \psi_i(t) \\ \dot{p}_{yi}(t) &= V_i(t) \cos \gamma_i(t) \sin \psi_i(t) \\ \dot{p}_{zi}(t) &= V_i(t) \sin \gamma_i(t) \\ \dot{V}_i(t) &= \frac{1}{m_i}(T_i(t) - p_i(t)) - g \sin \gamma_i(t) \\ \dot{\psi}_i(t) &= \frac{a_{yi}(t)}{V_i(t) \cos \gamma_i(t)} \\ \dot{\gamma}_i(t) &= \frac{-g \cos \gamma_i(t)}{\gamma_i(t)} + \frac{a_{pi}(t)}{V_i(t)} \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن، $p_i(t) = [p_{xi} \ p_{yi} \ p_{zi}]^T$ بردار موقعیت پهپاد در مختصات کارتزین، $V_i(t)$ سرعت، γ_i و ψ_i به ترتیب زاویه مسیر پرواز^۱ و زاویه جهت‌گیری^۲، m_i جرم پهپاد، g شتاب گرانشی، $D_i(t)$ نیروی پسا^۳، $T_i(t)$ نیروی پیش‌ران^۴، $a_{yi}(t)$ و $a_{pi}(t)$ شتاب‌های پیچ^۵ و یاو^۶ هستند. ورودی کنترل به صورت زیر بیان می‌گردد:

¹ Flight path angle

² Heading angle

³ Drag force

⁴ Thrust force

⁵ Pitch

⁶ Yaw

سرعت نهایی یا همان سرعت مطلوبی که برای پهپادها تعریف شده است برابر ۵ متر بر ثانیه است؛ به عبارت دیگر، همه پهپادها باید با کمک کنترل کننده‌ای که برای هر کدام از آنها نصب شده است به سرعت مطلوب برسند. کنترل کننده‌های نصب شده در هر کدام از پهپادها لازم است با همسایگان خود مطابق گراف ارتباطی ارائه شده، ارتباط برقرار کنند. اطلاعاتی که پهپادها باید با یکدیگر مبادله کنند سرعت و مختصات مکانی می‌باشد. به بیان دیگر، با توجه به تابع هزینه‌ای که در ادامه تعریف می‌شود پارامترهای سرعت و مختصات هر پهپاد باید بین پهپادها در حین مأموریت مبادله شود. با توجه به الگوریتم بهینه‌سازی که معرفی می‌شود، در حین بهینه‌سازی هر کدام از عامل‌ها عمل بهینه‌سازی را هماهنگ با پارامترهای بهینه‌ساز سایر عامل‌های موجود در شبکه انجام می‌دهند؛ بنابراین، نوع تابع هزینه، نقشی اساسی در اینکه مقادیر چه متغیرهای بین عامل‌ها مبادله می‌شوند، دارد.

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^N J_i(\theta) \quad (11)$$

تابع هزینه $J_i(\theta)$ برای هر کدام از پهپادها به صورت زیر تعریف شده است:

$$J_i = \int_t^{t+T} \frac{\rho_1}{2} (\theta_i(t') - v_d)^2 dt' + \rho_2 \sum_{j \in N_i} \exp \left(\frac{-g(p_i(t+T) - p_j(t+T))(p_i(t+T))}{-p_j(t+T)} \right) \quad (12)$$

که g ، ρ_1 و ρ_2 وزن‌های با مقادیر بزرگ‌تر از صفر هستند. v_d سرعت مطلوبی است که همه پهپادها باید به آن برسند. در این مسئله کنترلی، فرض شده که در ساختار پهپادهای شبکه شده هر عامل یا پهپاد i ام از طریق همکاری با همسایه‌های خود N_i ، سعی در کمینه کردن هزینه کلی J دارد. تابع هزینه در رابطه (۱۲) فرمول بندی شده است. این تابع هزینه پهپادها را مجبور می‌کند به سرعت مطلوبی که کاربر وارد کرده است برسند. البته پهپادها تا حد امکان از همسایگان خود باید بیشترین مقدار فاصله ممکن را روی دایره حفظ کنند. ساختار بهینه‌سازی که برای هر کدام از پهپادها انجام می‌شود مطابق زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{z}_i(t) &= \gamma \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} [\theta_j(t - \tau(t)) - \theta_i(t - \tau(t))] \\ \dot{\theta}_i(t) &= -\alpha \nabla f_i(w_a^i \theta_i(t) + w_n^{ij} \sum_{j \neq i, j \in N_i} \theta_j(t - \tau(t))) \\ &\quad - z_i(t) - \beta \sum_{j=1}^N \alpha_{ij} [\theta_j(t - \tau(t)) - \theta_i(t - \tau(t))] \end{aligned} \quad (13)$$

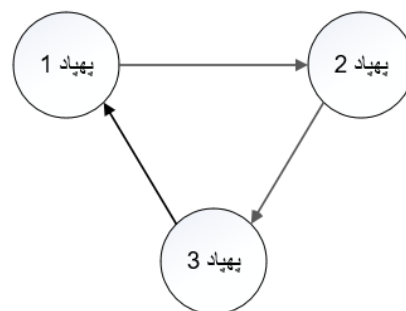
که α ، β و γ وزن‌هایی با مقادیر مثبت هستند. w_a^i و w_n^{ij} ضرایب وزنی به ترتیب مرتبط به عامل i و همسایگان آن هستند. باید توجه شود که ماتریس‌های $w_a = \text{diag}[w_a^i]_{N \times N}$

در اینجا چارچوب کنترل پیش‌بین توزیع شده برای به دست آوردن پارامترهای کنترلی پهپادهای شبکه شده که با یک تأخیر زمانی با یکدیگر در ارتباط و در حال همکاری هستند، استفاده می‌شود. با توجه به ماهیت ذاتی کنترل کننده پیش‌بین، این کنترل کننده بر اساس تکرار بهینه‌سازی تابع هزینه تعریف شده در افق زمانی محدود عمل می‌کند. البته انتخاب نوع الگوریتم بهینه‌سازی خود نیز یک چالش محسوب می‌شود که در اینجا الگوریتم ترکیب تجزیه دوگانه^۱ و اجماع^۲ که یکی از کارآمدترین الگوریتم‌ها در بهینه‌سازی توزیع شده می‌باشد در طراحی کنترل کننده استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی برای نشان دادن توانایی و کارایی روش کنترلی پیشنهادی، در ادامه استخراج شده‌اند.

در این سناریو همانند شکل (۵) سه پهپاد برای حرکت به سوی یک دایره با شعاع و مرکز مشخص خارج از دایره، استقرار یافته‌اند. به عبارتی دیگر، ابتدا باید به سوی دایره‌ای مشخص حرکت کنند و در ادامه، حرکت روی دایره را حفظ کنند و همچنین به سرعت مطلوبی که کاربر وارد کرده است برسند. البته سعی کنند بیشترین فاصله را از یکدیگر در انتهای مأموریت از هم داشته باشند. در اینجا، گراف ارتباطی انتخاب شده برای ارتباط برقرار کردن پهپادها، مطابق شکل (۶) می‌باشد.



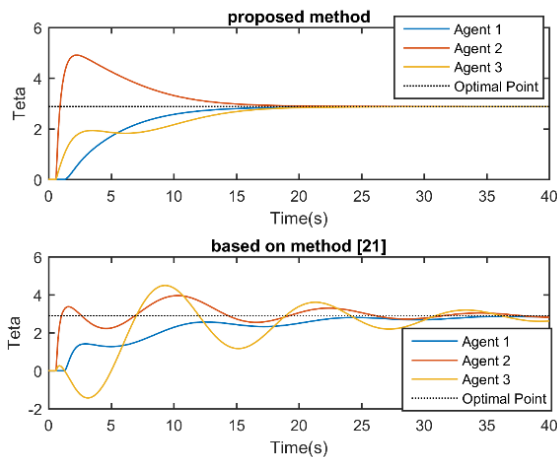
شکل (۵): موقعیت پهپادها نسبت به دایره مدنظر



شکل (۶): توپولوژی ارتباطی پهپادها

¹ Dual-decomposition

² Consensus



شکل (۸): مقدار θ بهازی تأخیر $40ms$

کانال ارتباطی، اعضای این سامانه شبکه شده را با بیشترین میزان تأخیر زمانی $\tau = 30ms$ به هم وصل می‌کند. طبق تابع هزینه تعریف شده در رابطه (۱۲)، پهادها محاسبات بهینه‌سازی را انجام می‌دهند. معادله نهایی پهادها به فرم انتگرال گیر مرتبه اول تبدیل شده است:

$$\dot{p}_i = u_i(t) \quad (14)$$

۲-۱. سناریوی اول

گراف ارتباطی که در بستر آن پهادها باهم ارتباط برقرار می‌کنند همانند شکل (۶) انتخاب شده است که در آن جهت فلش بیانگر امکان انتقال اطلاعات از یک پهاد به پهادهای همسایه می‌باشد. البته انتقال با یک تأخیر زمانی صورت می‌گیرد؛ یعنی، پهادها اطلاعات $\theta_i(t)$ و $x_i(t)$ را با یک تأخیر زمانی با یکدیگر مبادله می‌کنند. به عبارتی دیگر، پهاد i ام سرعت و موقعیت همسایه‌های خود را به‌جای این‌که در لحظه t دریافت کند در لحظه $t - \tau$ دریافت می‌کند که این تأخیر در سناریوی شبیه‌سازی برابر $\tau = 30ms$ فرض شده است.

هر پهاد دارای یک کنترل‌کننده داخلی است که نیاز به دریافت اطلاعاتی از همسایه‌های خود دارد تا به هدف کلی سامانه برسد. شرایط اولیه برای سرعت پهادها به‌صورت $\theta_1 = 12.01, \theta_2 = 11.63, \theta_3 = 10.74$ تنظیم شده است. با استفاده از چارچوب کنترل پیش‌بین توزیع‌شده می‌توان از بار محاسبات مسئله کاست. کنترل‌کننده پیش‌بین بر اساس تکرار بهینه‌سازی تابع هزینه تعریف‌شده در افق زمانی محدود کار می‌کند. افق پیش‌بین برای سامانه موردنظر برابر $T = 120ms$ و گام

و $w_a + w_n = I_{N \times N}$ باید شرط $w_n = [w_n^j]_{N \times N}, j \in N_i, j \neq i$ را ارضاء کنند.

نکته: نوآوری روش پیشنهادی این مقاله، در رابطه (۱۳) وقتی که گرادیان بر اساس اطلاعات خودِ عامل i ام و همسایگان آن می‌باشد، نهفته است. اثبات همگرایی مطابق مرجع [۲۱] است که قضیه نهایی این اثبات در پیوست قابل مشاهده است.

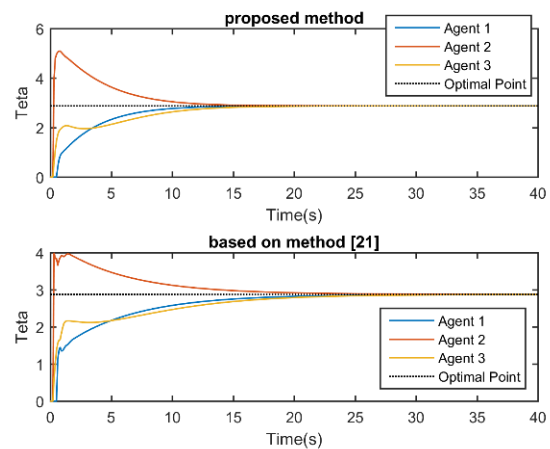
برای بیان صریح‌تر روش بهینه‌سازی پیشنهادی رابطه (۱۳) و مزیت‌های آن نسبت به روش مرجع [۲۱] شبیه‌سازی‌هایی برای سامانه زیر انجام می‌شود.

$$f_1(\theta) = 3\theta^2 - 2$$

$$f_2(\theta) = 4(\theta - 5)^2$$

$$f_3(\theta) = (\theta - 3)^2$$

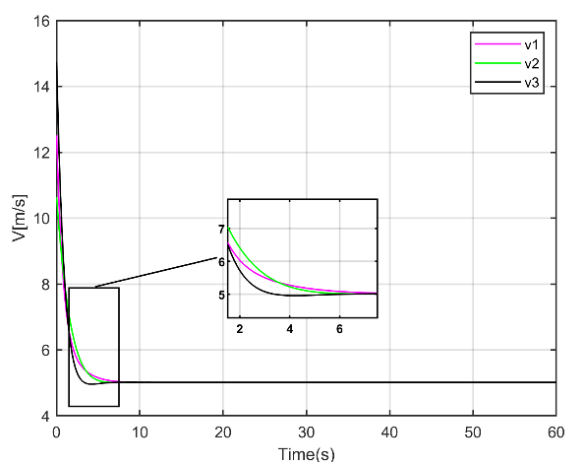
هرکدام از f ها یک تابع هزینه می‌باشد. نقطه بهینه سامانه بالا برابر $\theta^* = 2.875$ می‌باشد. در ادامه، عملکرد دو روش به‌ازای مقادیر تأخیر $20ms$ و $40ms$ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. توپولوژی ارتباطی بین توابع هزینه یا عامل‌ها مطابق شکل (۶) در نظر گرفته شده است.



شکل (۷): مقدار θ بهازی تأخیر $20ms$

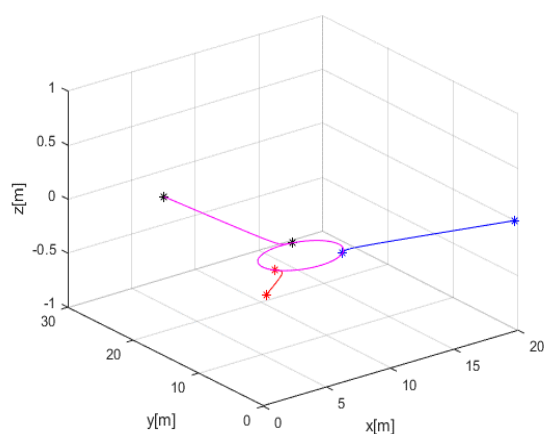
همان‌طور که از شکل (۷) پیداست، روش پیشنهادی این مقاله در زمان $t = 15s$ به نقطه بهینه همگرا شده است درحالی که روش مرجع [۲۱] در زمان $t = 20s$ به نقطه بهینه همگرا می‌شود. به عبارت دیگر، روش پیشنهادی این مقاله نرخ همگرایی سریع‌تری دارد. در گام بعدی، روش‌ها برای بیشترین میزان تأخیر قابل تحمل مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

شکل (۸) بیان‌گر عملکرد دو روش به‌ازای تأخیر بیشتر می‌باشد. از این شکل قابل مشاهده است که روش پیشنهادی به نقطه بهینه همگرا شده درحالی که روش رقیب واگرا شده است.



شکل (۹): تغییرات سرعت پهپادها

مکان هدف در نظر گرفته شده برای این که پهپادها به سویی آن حرکت کنند یک دایره با شعاع و مرکز مشخص می‌باشد. حال همان طور که از شکل (۱۰) پیداست پهپادها به دایره مورد نظر رسیده‌اند و در نهایت، فاصله مناسبی هم از یکدیگر پیدا کرده‌اند.



شکل (۱۰): مسیر حرکت پهپادها

شکل (۱۱) مسیر حرکت پهپادها را در یک فضای دوبعدی ترسیم می‌کند. نقاطی که بر روی دایره مشخص هستند بیانگر موقعیت نهایی پهپادها می‌باشند و نقاط خارج دایره، موقعیت اولیه هر کدام از پهپادها را نشان می‌دهند. در نهایت، می‌توان ادعا کرد که کنترل‌کننده طراحی شده، با توجه به شکل‌های به دست آمده و ساختار هدایتی که دارد، توانایی ارضاء کردن خواسته‌های مسئله را دارد.

زمانی نیز $\delta = 10ms$ انتخاب شده است. الگوریتم روش پیشنهادی به صورت زیر می‌باشد:

الگوریتم

❖ مقداردهی اولیه: برای وزن‌های $g, \rho_1, \beta, \alpha, \rho_2$ ، ضرایب وزنی w_a^i و w_n^i ، زمان نمونه‌برداری δ ، افق پیش‌بین T ، سرعت و مکان اولیه برای همه عامل‌های موجود در شبکه، مقدار عددی مناسب انتخاب شود.

❖ مرحله اول: در هر گام زمانی δ گام مرحله ۲ انجام شود. زمان حل معادلات برای هر کدام از پهپادها از δ تا $t+T$ می‌باشد.

❖ مرحله دوم: رابطه (۱۳) برای تمام پهپادهای موجود در شبکه حل شود.

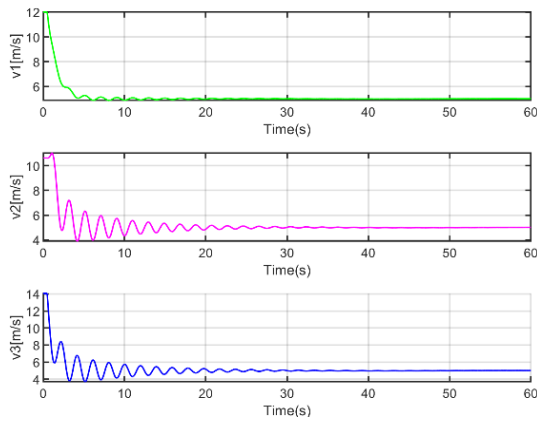
❖ مرحله سوم: در نهایت مقدار $\theta_i^*(t) = \theta_i(t)$ به دست آمده در معادله (۱۰) و (۱۴) اعمال شود.

❖ مرحله چهارم: پهپاد i مقادیر $\theta_i(t)$ و $x_i(t)$ را برای همسایه‌های خود ارسال می‌کند.

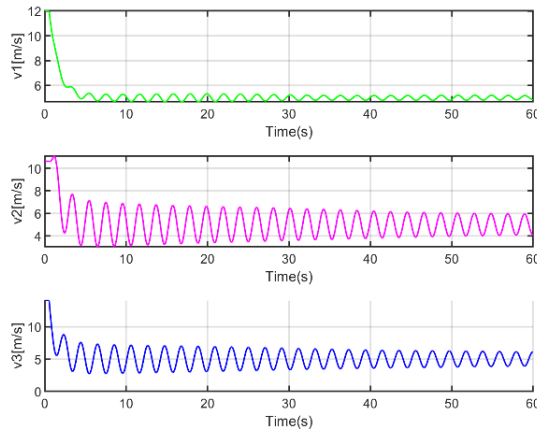
تا انتهای زمان شبیه‌سازی مراحل ۱ الی ۴ تکرار می‌شوند.

با توجه به الگوریتم بهینه‌سازی پیشنهاد شده در این تحقیق و ابزار کنترل پیش‌بین، الگوریتم فوق برای حرکت پهپادها معرفی شده است. در ادامه شبیه‌سازی‌ها برای سرعت هر کدام از پهپادهای موجود در شبکه با توجه به الگوریتم بهینه‌سازی و راهبرد معرفی شده هدایت پهپادها استخراج می‌شوند.

در شکل (۹) سرعت هر یک از پهپادها در طول حرکت نمایش داده شده است. همان‌طور که ذکر شد، یکی از اهداف کنترل حرکت پهپادها رسیدن به سرعت مطلوب ۵ متر بر ثانیه بوده است. با پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی و نمودارهای استخراج شده سرعت هر کدام از پهپادها به مقدار مطلوب میل کرده است.



شکل (۱۳): سرعت پهپادها به ازای تأخیر $\tau = 0.40ms$



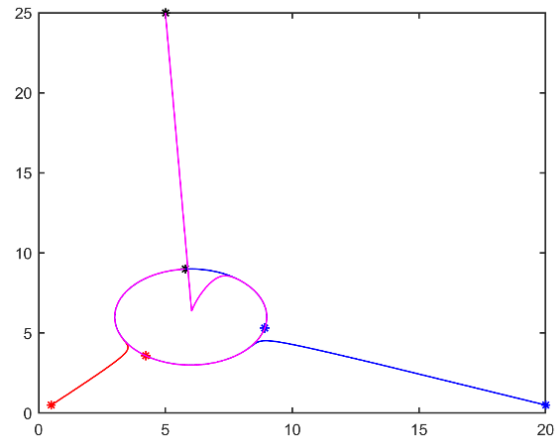
شکل (۱۴): سرعت پهپادها به ازای تأخیر $\tau = 50ms$

جدول (۱): تأثیر تأخیر در عملکرد سامانه

مقدار تأخیر	وضعیت پایداری
$\tau = 30ms$	حفظ پایداری با عملکرد مناسب
$\tau = 40ms$	حفظ پایداری با کاهش عملکرد
$\tau = 50ms$	از دست دادن پایداری

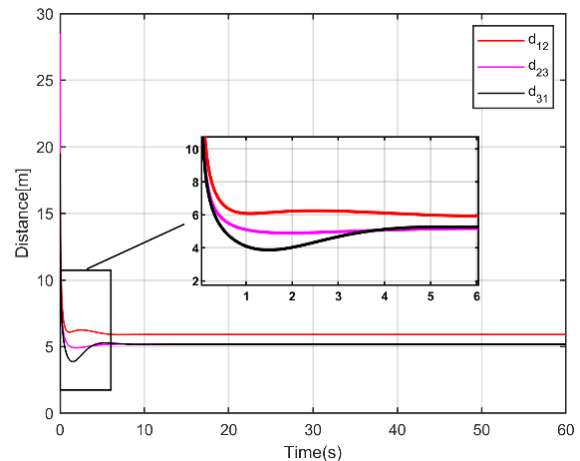
۲-۲. سناریوی دوم

در سناریوی دوم، عملکرد سامانه طراحی شده، به ازای تغییر خطی سرعت مطلوب که کاربر وارد می‌کند، به چالش کشیده می‌شود. به عبارت دیگر، سرعت مطلوب در نظر گرفته شده برای پهپادها در حین مأموریت در زمان‌های مختلف، تغییر می‌کند. مقادیر متفاوت شرایط اولیه با سناریوی اول برای سرعت پهپادها و مکان اولیه به ترتیب $\theta_1 = 15.01$, $\theta_2 = 8.63$, $\theta_3 = 24.056$ و $x_1 = [0.5; 0.5]$, $x_2 = [17; 1]$, $x_3 = [4; 20]$ تنظیم شده‌اند. افق پیش‌بین برابر $T = 120ms$ ، گام زمانی $\delta = 10ms$ و مقدار تأخیر



شکل (۱۱): مسیر حرکت پهپادها از زاویه حول محور z

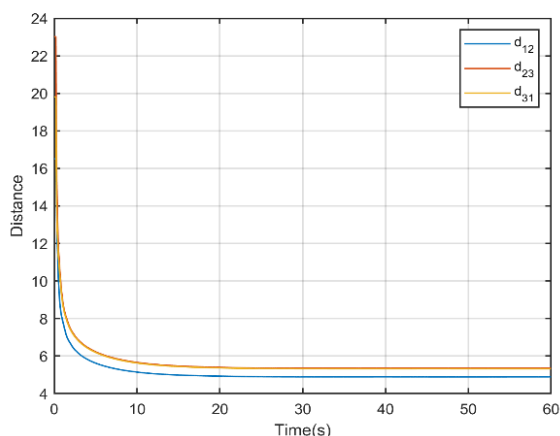
سه نقطه روی یک دایره به صورتی که هر کدام از نقطه‌ها فاصله ماکزیمم را نسبت به نقاط دیگر داشته باشند را در نظر بگیرید، حالت فرض شده شبیه یک مثلث متساوی‌الاضلاع روی دایره است؛ به عبارت دیگر در این حالت فاصله پهپادها از هم برابر می‌شود که این حالت به صورت کامل در شکل (۱۱) و شکل (۱۲) ارضاء شده است. برای ارزیابی قدرت تحمل تأخیر روش پیشنهادی، مقدار تأخیر را افزایش می‌دهیم تا عملکرد سامانه مورد آزمایش قرار بگیرد. در اولین گام، مقدار تأخیر $\tau = 40ms$ در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۲): فاصله پهپادها در طول حرکت

در شکل (۱۳) سرعت پهپادها با افزایش مقدار تأخیر به صورت نوسانی به سمت سرعت مطلوب میل می‌کند.

همان‌طور که از شکل (۱۴) پیداست سامانه قدرت تحمل تأخیر $\tau = 50ms$ را ندارد. برای بهتر مشخص شدن قدرت تحمل تأخیر و تأثیر آن در عملکرد سامانه، می‌توان به جدول (۱) توجه کرد.



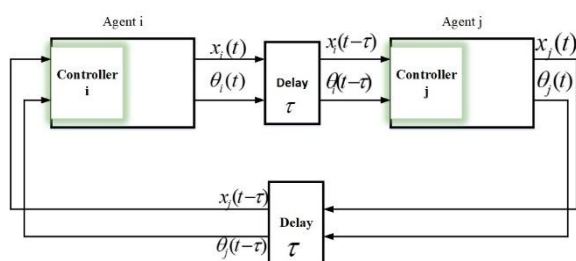
شکل (۱۷): فاصله بین پهپادها در طول حرکت

۳. نوآوری‌ها و دستاوردهای روش کنترلی پیشنهادی

هدف از ارائه این مقاله طراحی کنترل‌کننده‌ای است که توسط آن اهداف یک مأموریت (رسیدن به سرعت مطلوب و حفظ آرایش مطلوب) در گروهی از پهپادهای شبکه شده، با فرض وجود تأخیر در تبادل اطلاعات بین پهپادها برآورده شود. نوآوری‌ها و دستاوردهای روش کنترلی پیشنهادی به‌طور خلاصه و به‌صورت زیر ارائه می‌شوند:

۱. روش بهینه‌سازی توزیع شده در مرجع [۲۱] توسعه داده شد و در قالب رابطه (۱۳) بیان گردید. مزایای روش بهینه‌سازی جدید عبارت‌اند از: نرخ همگرایی سریع و قدرت تحمل تأخیر بیشتر.

۲. عملکرد روش کنترلی پیشنهادی، با دیاگرام بلوکی شکل (۱۸) برای گروهی از پهپادها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که آرایش مطلوب پهپادها با وجود تأخیر در تبادل اطلاعات حفظ می‌شود.



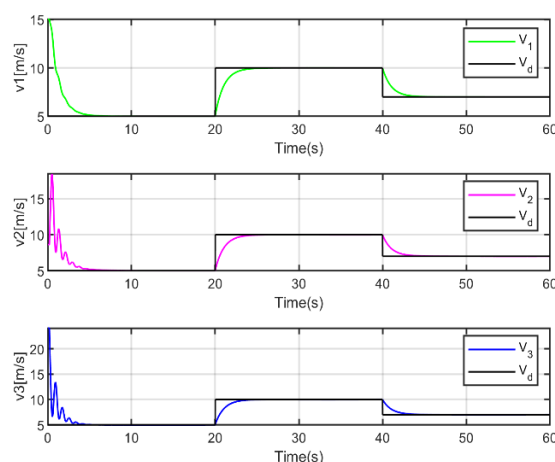
شکل (۱۸): دیاگرام بلوکی پیاده‌سازی کنترل‌کننده پیشنهادی

$x_i(t)$ و $\theta_i(t)$ به ترتیب سرعت و مختصات پهپاد i هستند. هر کدام از پهپادها سرعت و مختصات خود را با همسایه‌ها به اشتراک می‌گذارند. در کنترل‌کننده i مختصات و سرعت بهینه

زمانی $\tau = 30ms$ هستند. همچنین گراف ارتباطی که در بستر آن پهپادها باهم ارتباط برقرار می‌کنند همانند سناریوی اول می‌باشد.

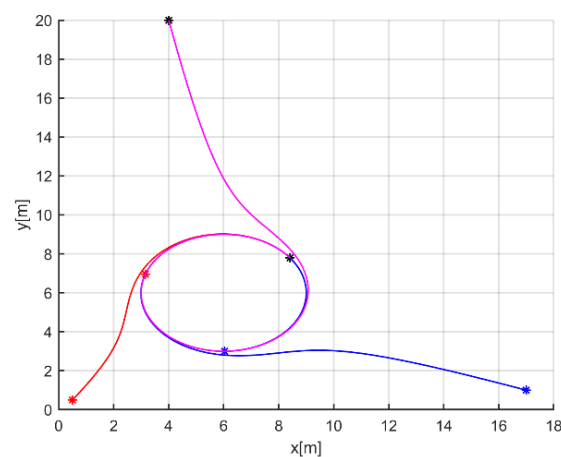
سرعت مطلوب برخلاف سناریوی اول، در اینجا در حین مأموریت در بازه‌های زمانی مختلف، مقادیر متفاوتی مانند $v_d = 5 \rightarrow (0, 20)s, 10 \rightarrow (20, 40)s, 7 \rightarrow (40, 60)s$ پهپادها انتخاب می‌شود.

همان‌طور که از شکل (۱۵) پیداست، سرعت پهپادها در هر سه بازه زمانی مختلف به سرعت مطلوب میل کرده است.



شکل (۱۵): سرعت پهپادها به ازای سرعت مطلوب متغیر با زمان

در شکل (۱۶) مسیر پیموده شده توسط پهپادها و موقعیت اولیه و انتهایی آن‌ها قابل مشاهده می‌باشد. با استفاده از نمودارهای استخراج شده در شکل (۱۶) و شکل (۱۷) می‌توان ادعا کرد که سامانه به دومین قسمت از هدف بهینه‌سازی که در نهایت، فاصله گرفتن عامل‌ها از هم بود، دست یافته است.



شکل (۱۶): مسیر پهپادها در طول حرکت

در حین انتقال داده وجود دارند. همچنین مشکل تأخیرهای تصادفی، موضوعاتی هستند که در نظر گرفتن آنها می‌تواند مورد توجه قرار گیرد.

۲. موضوع مهم دیگری که می‌توان در کنترل آرایش در نظر گرفت حالتی است که توپولوژی آرایش گروه در طول زمان تغییر کند. این موضوع از جمله چالش‌های مهم در کنترل آرایش است که بررسی کردن آن بسیار کاربردی می‌باشد.

۳. بدیهی است که در محیط و شرایط واقعی زمانی که پهپادها قصد انجام مأموریتی را با همکاری یکدیگر داشته باشند، موانع ثابت و متحرکی در سر راه مأموریت آنها وجود دارند. بنابراین، باید پهپادها مجهز به سامانه عدم برخورد به موانع باشند. در نتیجه، طراحی کنترل‌کننده‌ای که عدم برخورد با موانع ثابت و متحرک را تضمین نماید، بسیار مهم و ضروری می‌باشد.

۶. مراجع

- [1] M. A. Goodrich, B. S. Morse, C. Engh, J. L. Cooper, and J. A. J. I. S. Adams, "Towards using unmanned aerial vehicles (UAVs) in wilderness search and rescue: Lessons from field trials," vol. 10, no. 3, pp. 453-478, 2009.
- [2] S. J. A. P. Bartzak, "Identifying barriers to knowledge management in the United States military," p. 343, 2002.
- [3] X. Ge, F. Yang, and Q.-L. J. I. S. Han, "Distributed networked control systems: A brief overview," vol. 380, pp. 117-131, 2017.
- [4] W. Ren, "Consensus seeking, formation keeping, and trajectory tracking in multiple vehicle cooperative control," 2004.
- [5] Q. Yang, M. Cao, H. G. de Marina, H. Fang, J. J. S. Chen, and C. Letters, "Distributed formation tracking using local coordinate systems," vol. 111, pp. 70-78, 2018.
- [6] H. Yu, P. Shi, C.-C. Lim, and D. Wang, "Formation control for multi-robot systems with collision avoidance," *International Journal of Control*, pp. 1-12, 2018.
- [7] J. Qin, Q. Ma, Y. Shi, and L. J. I. T. o. I. E. Wang, "Recent advances in consensus of multi-agent systems: A brief survey," vol. 64, no. 6, pp. 4972-4983, 2017.
- [8] K.-K. Oh, M.-C. Park, and H.-S. J. A. Ahn, "A survey of multi-agent formation control," vol. 53, pp. 424-440, 2015.
- [9] M. Peymankar, P. Ranjbar, A. Izadipour and S. Balouchian, "Modelling and Solving the Location Problem of Fire Launching Sites %J Electronic and Cyber Defense," vol. 6, no. 3, pp. 45-57, 2018.
- [10] A. Nedic and A. Ozdaglar, "Distributed Subgradient Methods for Multi-Agent Optimization," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, no. 1, pp. 48-61, 2009.

برای پهپاد i با توجه به اطلاعات دارای تأخیر دریافتی از پهپاد j طبق الگوریتم ذکر شده در بخش قبلی محاسبه می‌شوند. پهپاد i نیز اطلاعات به‌روز شده خود را به پهپاد j می‌فرستد ولی این اطلاعات در زمان $t - \tau$ به دست پهپاد j می‌رسند.

۳. عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی به ازای سرعت مطلوب ثابت و متغیر با زمان بررسی شد. نتایج نشان داد پهپادها به سرعت مطلوب ثابت و متغیر با زمان، با حفظ آرایش مطلوب می‌رسند.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای حل یک مسئله بهینه‌سازی توزیع شده در حضور تأخیر ارتباطی معرفی شد. اساس بهینه‌سازی در این رویکرد بر مبنای روش تجزیه دوگانه و اجماع می‌باشد. این مسئله بهینه‌سازی در کنترل آرایش حرکت پهپادها مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی از دو سناریوی متفاوت استفاده شد. رسیدن به سرعت مطلوب و موقعیت خاص از اهداف هر کدام از سناریوها است. نتایج و شکل‌های به‌دست آمده نشان دادند که پهپادها با استفاده از این روش پیشنهادی به اهداف مورد نظر دست می‌یابند. به عبارت دیگر، هر سه پهپاد با توجه به گراف ارتباطی تعریف شده، به سرعت مطلوب $v_d = 5m/s$ رسیدند. همچنین پهپادها به فاصله مناسبی از یکدیگر دست یافتند. در نهایت می‌توان گفت این روش مقدار تأخیر زمانی قابل‌توجهی را تحمل می‌کند و همچنین نرخ همگرایی سریعی برای رسیدن به حالت بهینه سامانه را دارد. این الگوریتم می‌تواند برای سامانه‌های شبکه شده دیگری مانند یک گروه از ربات‌های سیار شبکه شده، مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به کاربردهای فراوان کنترل آرایش و حرکت سامانه‌های شبکه شده در زمینه‌های نظامی و خدماتی، توسعه بیشتر این روش پیشنهادی در زمینه پهپادهای شبکه شده می‌تواند بر افزایش توانمندی‌های آفندی و پدافندی مؤثر باشد.

۵. پیشنهادات

به‌منظور توسعه و طراحی کنترل‌کننده‌ای مجهز و پیشرفته‌تر در راستای کارهای انجام شده در این مقاله می‌توان پیشنهادات زیر را ارائه نمود:

۱. در سامانه‌های شبکه شده، علاوه بر تأخیر ارتباطی مشکلات دیگری مانند از دست رفتن بسته‌های داده

- [27] P. Lin, W. Ren, and Y. J. A. Song, "Distributed multi-agent optimization subject to nonidentical constraints and communication delays," vol. 65, pp. 120-131, 2016.
- [28] D.-H. Kim and J.-H. Kim, "A real-time limit-cycle navigation method for fast mobile robots and its application to robot soccer," Robotics and Autonomous Systems, vol. 42, no. 1, pp. 17-30, 2003.

۷. پیوست

قضیه: سامانه دینامیکی (۱۳) به ازای هر مقدار اولیه در $S(0_n)$ همگرا می‌شود به حل بهینه مسأله (۱۱) برای هر تأخیر کران دار $\tau(t) \in [0, \bar{\tau}]$ با $\dot{\tau}(t) \leq \varpi$ ، اگر ماتریس‌های S, P_4 و ماتریس‌های مثبت معین Q_1, Q_2, Q_3, P_3 و مقدار مثبت δ وجود داشته باشند به طوری که نامساوی‌های ماتریسی زیر برقرار باشد:

$$\begin{bmatrix} Q_2 & S \\ * & Q_2 \end{bmatrix} > 0$$

$$\begin{pmatrix} \rho_{11} I_{N-1} & P_4 \\ P_4^T & \rho_{22} I_{N-1} & P_2 \\ & P_2^T & P_3 \end{pmatrix} > 0$$

$$\begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & \Pi_{13} & \Pi_{14} & \Pi_{15} & \Pi_{16} & \Pi_{17} & \Pi_{18} & 0 \\ * & \Pi_{22} & \Pi_{23} & \Pi_{24} & \Pi_{25} & \Pi_{26} & \Pi_{27} & \Pi_{28} & 0 \\ * & * & \Pi_{33} & \Pi_{34} & \Pi_{35} & \Pi_{36} & \Pi_{37} & \Pi_{38} & -\bar{\tau} Q_2 \\ * & * & * & \Pi_{44} & \Pi_{45} & \Pi_{46} & \Pi_{67} & \Pi_{68} & 0 \\ \vdots & * & * & * & \Pi_{55} & \Pi_{56} & \Pi_{57} & \Pi_{58} & \bar{\beta} Q_2 J \\ * & * & * & * & * & \Pi_{66} & \Pi_{67} & \Pi_{68} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & \Pi_{77} & \Pi_{78} & \bar{\tau} \alpha Q_2 \\ * & * & * & * & * & * & * & \Pi_{88} & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & -Q_2 \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

$$\Pi_{11} = \underline{m}(2\gamma\hat{I} - (\frac{2\alpha}{a_1} p_{11}))a_1^2, \Pi_{12} = 0,$$

$$\Pi_{13} = -P_4, \Pi_{14} = \frac{1}{2}\underline{m}(2\gamma\hat{I} - (\frac{2\alpha}{a_1} p_{11}))z_{11}$$

$$\Pi_{15} = \frac{1}{2}\underline{m}(2\gamma\hat{I} - (\frac{2\alpha}{a_1} p_{11}))z_{12}, \Pi_{16} = 0,$$

$$\Pi_{17} = -\alpha P_4, \Pi_{18} = 0$$

$$\Pi_{22} = Q_1 - Q_2 + Q_3 + \underline{m}(2\gamma\hat{I} - (\frac{2\alpha}{a_1} p_{11}))a_1^2 I_{N-1},$$

$$\vdots - p_{22} I_{N-1}, \Pi_{24} = \frac{1}{2}\underline{m}(2\gamma\hat{I} - (\frac{2\alpha}{a_1} p_{11}))z_{21},$$

$$\Pi_{25} = \gamma P_2 J - \beta p_{22} J + Q_2 - S + \frac{1}{2}\underline{m}(2\gamma\hat{I} - (\frac{2\alpha}{a_1} p_{11}))z_{22}$$

$$\Pi_{26} = S, \Pi_{27} = -\alpha(p_{22} - p_{11})I_{N-1}, \Pi_{28} = -\alpha P_4^T,$$

$$\Pi_{33} = -P_2^T - P_2, \Pi_{34} = 0, \Pi_{35} = -\beta P_2 J + \gamma P_3 J,$$

$$\Pi_{36} = 0, \Pi_{37} = -\alpha P_2, \Pi_{38} = 0$$

- [11] I. Lobel and A. Ozdaglar, "Distributed subgradient methods for convex optimization over random networks," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 56, no. 6, pp. 1291-1306, 2011.
- [12] H. Terelius, U. Topcu, and R. M. Murray, "Decentralized multi-agent optimization via dual decomposition," IFAC Proceedings Volumes, vol. 44, no. 1, pp. 11245-11251, 2011.
- [13] F. Farokhi, I. Shames, and K. H. Johansson, "Distributed MPC via dual decomposition and alternative direction method of multipliers, in Distributed model predictive control made easy: Springer, 2014, pp. 115-131.
- [14] G. N. Droge, "Behavior-based model predictive control for networked multi-agent systems," Georgia Institute of Technology, 2014.
- [15] J.-P. Richard, "Time-delay systems :an overview of some recent advances and open problems," automatica, vol. 39, no. 10, pp. 1667-1694, 2003.
- [16] M. G. Rabbat and R. D. Nowak, "Quantized incremental algorithms for distributed optimization," IEEE Journal on Selected Areas in Communications ,vol. 23, no. 4, pp. 798-808, 2005.
- [17] S.-I. Niculescu, "Delay effects on stability: a robust control approach," Springer Science & Business Media, 2001.
- [18] W. Xu, J. Cao, M. Xiao, D. W. Ho, and G. Wen, "A new framework for analysis on stability and bifurcation in a class of neural networks with discrete and distributed delays," IEEE transactions on cybernetics, vol. 45, no. 10, pp. 2224-2236, 2015.
- [19] J. Li, G. Li, Z. Wu, and C. J. O. L. Wu, "Stochastic mirror descent method for distributed multi-agent optimization," vol. 12, no. 6, pp. 1179-1197, 2018.
- [20] T. Hatanaka, N. Chopra, T. Ishizaki, and N. J. I. T. o. A. C. Li, "Passivity-based distributed optimization with communication delays using PI consensus algorithm," vol. 63, no. 12, pp. 4421-4428, 2018.
- [21] S. Yang, Q. Liu, J. J. I. T. S. Wang, Man, and C. Systems, "Distributed Optimization Based on a Multiagent System in the Presence of Communication Delays," vol. 47, no. 5, pp. 717-728, 2017.
- [22] M. R. Davoodi et al., "An Overview of Cooperative and Consensus Control of Multiagent Systems," pp. 1-35, 1999.
- [23] A. Abdessameud and A. J. A. Tayebi, "Formation control of VTOL unmanned aerial vehicles with communication delays," vol. 47, no. 11, pp. 2383-2394, 2011.
- [24] J. Zhou, Q. Hu, Y. Zhang, and G. Ma, "Decentralised adaptive output feedback synchronisation tracking control of spacecraft formation flying with time-varying delay," IET Control Theory & Applications, vol. 6, no. 13, pp. 2009-2020, 2012.
- [25] R. Wang and J. J. C. J. o. A. Liu, "Adaptive formation control of quadrotor unmanned aerial vehicles with bounded control thrust," vol. 30, no. 2, pp. 807-817, 2017.
- [26] Y. Zou, Z. Zhou, X. Dong, and Z. J. I. A. T. o. M. Meng, "Distributed formation control for multiple vertical takeoff and landing UAVs with switching topologies," vol. 23, no. 4, pp. 1750-1761, 2018.

$$\begin{aligned}
\Pi_{44} &= \underline{m}(2\gamma\hat{I} - (\frac{2\alpha}{a_1} p_{11}))x_{11}, \Pi_{45} = \frac{1}{2}\underline{m}(2\gamma\hat{I} - (\frac{2\alpha}{a_1} p_{11}))z_{12}, \\
\Pi_{46} &= 0, \Pi_{47} = \frac{1}{2}(\frac{2\alpha}{a_1} p_{11})R_{12}, \Pi_{48} = \frac{1}{2}(\frac{2\alpha}{a_1} p_{11})R_{11} \\
\Pi_{55} &= -(1-\varpi)Q_3 - 2Q_2 + S^T + S + \underline{m}(2\gamma\hat{I} - (\frac{2\alpha}{a_1} p_{11}))x_{22}, \\
\Pi_{56} &= Q_2 - S, \Pi_{57} = \frac{1}{2}(\frac{2\alpha}{a_1} p_{11})R_{22}, \\
\Pi_{58} &= \frac{1}{2}(\frac{2\alpha}{a_1} p_{11})R_{21}, \Pi_{66} = -Q_1 - Q_2, \\
\Pi_{67} &= 0, \Pi_{68} = 0, \Pi_{77} = -\delta I_{N-1}, \\
\Pi_{78} &= 0, \Pi_{88} = -\delta I_{N-1}
\end{aligned}$$

Guidance and distributed control of the networked UAVs

J. Khalil pour*, M. Veysi, F. Rahimi

*Khatam ol Anbia University, Tehran

(Received: 09/09/2018, Accepted: 05/03/2019)

ABSTRACT

The ability in Unmanned Aerial Vehicle Guidance and Control has become an important priority in the air defense field of any country, as one of the modern tools of technology in aerospace systems. In this paper, a group of networked UAVs are considered that follow closely the same objectives. The UAVs communicate with each other and exchange important information such as their velocities and positions with other members in the network. For this purpose, the controller is designed in a distributed approach. Due to the nature of the system, the distributed optimization algorithm is used to implement the network structure as well as to reduce the volume of computation. There are many challenges in the networked system and its optimal solution, such as maintaining optimal arrangement, communication delay and efficient use of energy. It is necessary that the designed controller holds the appropriate performance in the presence of aforementioned challenges. Finally, simulations are carried out in the Matlab software for investigating the performance of the proposed approach. The results indicate a higher rate of convergence and a more acceptable rate of delay compared to previous methods.

Keywords: Distributed command and control, Communication systems, Networked UAVs, Communication delay, Optimization

* Corresponding Author Email: j_khalilpour@yahoo.com

