

طراحی مسیر برای پهپادهای همکار جهت فریب شبکه راداری در حضور نایقینی در موقعیت رادارها

سیدمحمد مهدی دهقان بنادکی^{۱*}، عبدالرضا کاشانی نیا^۲

۱ - استادیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲)

چکیده

ایجاد هدف مجازی جهت فریب شبکه راداری به کمک پهپادهای همکار به عنوان یک راهکار مؤثر برای مقابله با شبکه‌های راداری توسعه یافته است. در پژوهش‌های پیشین، الگوریتم طراحی مسیر پهپادهای همکار برای ایجاد یک هدف مجازی به کمک مؤلفه طراحی مسیر و با الهام از رفتار شکارچی و شکار در طبیعت توسعه داده شده است. یکی از فرضیات به کار گرفته شده در این الگوریتم، مشخص بودن موقعیت رادارهای سامانه پدافندی برای پهپادهای همکار می‌باشد. در کاربردهای واقعی موقعیت رادارها دارای نایقینی فراوانی است. وجود نایقینی در موقعیت رادار باعث می‌شود تا یک هدف مجازی مشترک برای تمامی رادارهای موجود در شبکه راداری ایجاد نشود. در این حالت، بین اهداف مجازی ایجاد شده توسط پهپادهای همکار فاصله به وجود می‌آید و شبکه راداری به کمک این فاصله، فریب را تشخیص می‌دهد. در این پژوهش تأثیر نایقینی در موقعیت رادار بر القای هدف مجازی مشترک در شبکه راداری تحلیل شده و با تنظیم خودکار حد پایین برای مؤلفه طراحی مسیر، حرکت پهپادها در مسیری که احتمال شناسایی فریب را افزایش می‌دهد، محدود می‌شود. این قید با توجه به حداکثر نایقینی در موقعیت رادارها، میزان دقت آنها و مسیر هدف مجازی مشخص می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تنظیم خودکار این قید در الگوریتم طراحی مسیر پیشنهادی برای پهپادهای همکار، احتمال شناسایی فریب به ازای مقادیر مختلف نایقینی در موقعیت رادارها نسبت به روش‌های مرسوم طراحی مسیر مبتنی بر حد پایین ثابت کاهش محسوسی می‌یابد.

کلید واژه‌ها: پهپادهای همکار، شبکه راداری، فریب رادار، هدف مجازی، نایقینی در موقعیت رادار

۱- مقدمه

در شبکه راداری به صورت هم زمان فریب داده شده و یا دچار اختلال شوند.

در سال‌های اخیر، ایجاد هدف مجازی به کمک گروهی از پهپادهای همکار به عنوان راهکاری مناسب جهت مقابله با شبکه‌های راداری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۴،۳]. در این راهکار به ازای هر رادار در شبکه راداری یک پهپاد وجود دارد و هر پهپاد سیگنال رادار مربوطه را دریافت کرده و پس از اعمال تأخیر مناسب (زمانی و فرکانسی) سیگنال را بازتاب می‌دهد. در نتیجه رادار یک هدف مجازی را در فاصله‌ای دورتر از پهپاد مشاهده خواهد کرد. در این روش، اگر تمامی پهپادها یک هدف مشترک را به رادارها القا کنند، شبکه راداری فریب داده می‌شود [۵]. شکل (۱) حالتی که سه پهپاد قصد فریب شبکه راداری شامل سه رادار را دارند، نشان می‌دهد. وجه همکاری پهپادها در این مسئله، القای هدف مجازی مشترک در سامانه یکپارچه

یکی از فناوری‌های نوظهور در عرصه سامانه‌های راداری، شبکه‌های راداری هستند. شبکه راداری متشکل از چندین رادار است که در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف مستقر شده‌اند و به صورت یکپارچه و در تعامل با یکدیگر عمل می‌نمایند. نشان داده شده است که شبکه‌های راداری در کاربردهای مختلفی از قبیل شناسایی هدف در حال حرکت، جهت‌یابی و موقعیت‌یابی نسبت به رادارهای معمولی توانایی بالاتری دارند و می‌توانند چالشی اساسی در مسیر نفوذ به یک سامانه پدافندی ایجاد نمایند [۲،۱]. همچنین، در صورتی که یکی از رادارها دچار اختلال شود و یا فریب داده شود، رادار قربانی می‌تواند با استفاده از اطلاعات سایر رادارها فریب یا اختلال را تشخیص دهد [۳]. جهت نفوذ به چنین سامانه پدافندی باید تمامی رادارهای موجود

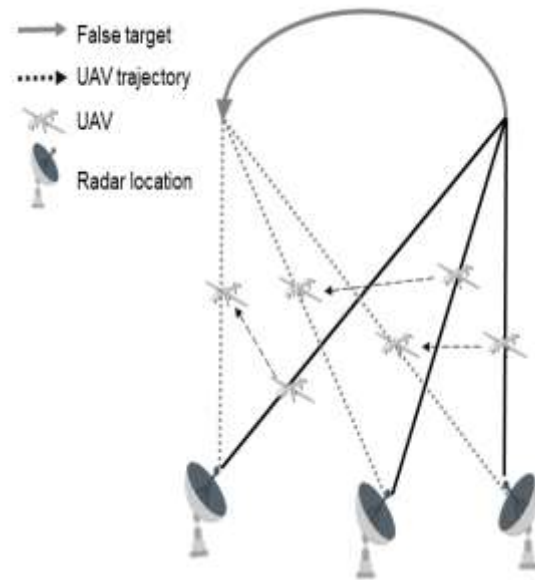
* رایانامه نویسنده مسئول: smmd@mut.ac.ir

کمک مؤلفه طراحی مسیر، مسیر حرکت پهپادها طراحی می‌شود. در [۱۲] طراحی مسیر برای پهپادها به گونه‌ای که بتوانند با کمترین مانور آن را طی کنند، مورد توجه قرار گرفته‌است. در [۱۳] راهکاری جهت انتقال برخی از قیود مسئله به تابع هزینه مطرح شده که منجر به ساده‌تر شدن شرایط مرزی و کاهش حجم محاسبات می‌شود. در طراحی مسیر برای پهپادها جهت ایجاد هدف مجازی، فرض می‌شود که موقعیت رادارها دقیقاً مشخص است. اما در واقعیت وجود نایقینی در موقعیت رادارها در مرحله شناسایی به دلیل نویز اندازه‌گیری الکترونیکی و خطای همگام‌سازی اجتناب ناپذیر است [۱۴، ۱۰]. همچنین ممکن است به دلیل استراتژی‌های به‌کار گرفته شده در جهت حفاظت از سامانه‌ها، موقعیت رادارها را به صورت پیوسته در یک همسایگی محلی تغییر دهند. از آنجایی که فریب شبکه راداری توسط ایجاد تأخیر در سیگنال دریافتی از رادار انجام می‌شود، لذا حضور پهپاد روی خط واصل رادار و هدف مجازی لازم است. وجود نایقینی در موقعیت رادار باعث می‌شود هدف مجازی ایجاد شده توسط پهپاد از هدف مجازی مرجع (هدف مجازی که برای آن طراحی مسیر انجام گرفته‌است) فاصله بگیرد [۱۴]. شبکه راداری با استفاده از فاصله ایجاد شده بین اهداف مجازی که توسط پهپادها ایجاد شده‌است، فریب را تشخیص می‌دهد.

در این پژوهش، وجود نایقینی در موقعیت رادارها بررسی شده و روشی برای محاسبه خودکار حد پایین مؤلفه طراحی مسیر جهت به حداقل رساندن احتمال شناسایی فریب توسط شبکه راداری ارائه شده‌است این حد پایین برای مؤلفه طراحی مسیر با توجه به حداکثر نایقینی موجود در موقعیت رادار و میزان خطای رادار محاسبه شده و به‌عنوان یک قید در مسئله بهینه‌سازی لحاظ می‌شود. این قید حرکت پهپادها را در مسیری که احتمال شناسایی فریب را افزایش می‌دهد، محدود می‌کند. در این مقاله فرض شده‌است که پهپادها دارای ادوات الکترونیکی مناسب جهت دریافت، پردازش و بازتاب سیگنال رادار هستند و رادار امکان تمیز دادن سیگنال ارسالی توسط پهپاد از سیگنال بازتاب شده از هدف واقعی را ندارد و بر این اساس، مقاله به مسئله طراحی مسیر و محاسبه ناحیه قابل پرواز برای پهپادها پرداخته است.

در بخش (۲)، ابتدا الگوریتم طراحی مسیر جهت فریب شبکه راداری توسط گروهی از پهپادها ارائه شده و سپس اثر وجود نایقینی در موقعیت رادار بررسی شده‌است. پس از آن روش تشخیص فریب توسط شبکه راداری و نحوه محاسبه حد پایین مؤلفه طراحی مسیر بیان شده‌است. در بخش (۳) نتایج شبیه

راداری است و طراحی مسیر هدف مجازی به‌طور مستقیم بر طراحی مسیر پهپادها اثر می‌گذارد.



شکل (۱): فریب شبکه راداری به کمک پهپادهای همکار.

ایده اولیه ایجاد هدف مجازی به کمک گروهی از پهپادهای همکار جهت فریب شبکه راداری، ابتدا در [۵] مطرح شد. پس از آن مطالعات زیادی به بررسی ابعاد مختلف این راهکار در فضای دو بعدی و سه بعدی پرداختند. در مطالعه صورت گرفته در [۴] محدوده قابل پرواز برای پهپادها در فضای دو بعدی بررسی شده‌است در [۶] الگوریتمی در فضای دو بعدی ارائه گردید که محدودیت‌های حرکتی پهپاد را به محدودیت‌های حرکت هدف مجازی ترجمه می‌کند. در فضای سه بعدی به دلیل ابعاد مؤلفه‌ای بالای مسئله و قیود تساوی و نامساوی، طراحی مسیر دشوارتر خواهد بود. در [۷] با تصویر کردن موقعیت رادار روی صفحه، طراحی مسیر در فضای دو بعدی انجام گرفته و سپس نتایج حاصل به فضای سه بعدی توسعه داده شده‌است در مراجع [۸، ۹، ۱۰] با الهام از رفتار شکارچی و شکار در طبیعت، راهکاری جهت طراحی مسیر در فضای سه بعدی ارائه شده‌است. در این روش با بازنویسی روابط طراحی بر اساس یک مؤلفه کمکی طراحی مسیر (pcp^۱)، ابعاد مؤلفه‌ای مسئله به شدت کاهش می‌یابد. در [۱۱] دو حلقه بهینه‌سازی برای محاسبه مسیر پهپادها جهت کاربردهای بلادرنگ طراحی شده‌است. در حلقه اول مسیرهای مجاز برای هدف مجازی تعیین می‌شود و در حلقه دوم براساس مسیر هدف مجازی به‌دست آمده در حلقه اول و به

^۱ Path control parameter

معرفی سایر مؤلفه‌ها نیز در جدول (۱) ارائه شده‌است با داشتن مقادیر متغیرهای کنترلی می‌توان مسیر هر کدام از پهپادها را محاسبه کرد. در ادامه نحوه بازنویسی متغیرهای حالت و کنترلی بر اساس یک متغیر کمکی بیان می‌شود. مزیت استفاده از این متغیر کمکی آن است که با محاسبه آن می‌توان تمامی متغیرهای حالت و کنترلی را محاسبه کرد. در این صورت ابعاد مؤلفه‌ای مسئله طراحی مسیر کاهش می‌یابد.

جدول (۱): تعریف مؤلفه‌های مرتبط با پهپاد [۱۰]

مؤلفه	نام	مقدار
S	Wing area	۳۷/۱۶ m ²
C _{D0}	Zero lift drag coefficient	۰/۰۲
k _n	Load factor effectiveness	۱
k	Induced drag coefficient	۰/۱
g	Gravitational coefficient	۹/۸۱ m/s ²
ρ	Atmosphere density	۱/۲۲ Kg/m ³
w	Weight of selected UAV	۱۴۵۱۵gr

حضور پهپاد روی خط واصل رادار و هدف مجازی را می‌توان توسط رابطه (۳) نشان داد. به کمک این رابطه می‌توان با استفاده از موقعیت رادار، هدف مجازی و مؤلفه طراحی مسیر (V) موقعیت پهپاد را محاسبه کرد.

$$x_a = x_r + v(x_p - x_r) \quad (3)$$

در این رابطه x_a, x_r, x_p به ترتیب موقعیت هدف مجازی، موقعیت رادار و موقعیت پهپاد است. مؤلفه v بیانگر نسبت فاصله پهپاد تا رادار به فاصله هدف مجازی تا رادار است. با تغییر مؤلفه v بین صفر و یک موقعیت پهپاد بین رادار و هدف مجازی تغییر می‌کند. با مشتق‌گیری از رابطه (۳) روابط زیر حاصل می‌شود.

$$\dot{x}_a = \dot{x}_r + v\dot{x}_{p-r} + v\dot{x}_{p-r} \quad (4)$$

$$\ddot{x}_a = \ddot{x}_r + 2v\ddot{x}_{p-r} + v\ddot{x}_{p-r} + \dot{v}\dot{x}_{p-r}$$

حال با استفاده از روابط (۳،۴) می‌توان سایر متغیرهای حالت در رابطه (۱) را محاسبه کرد.

$$v = \frac{(\dot{x}_a^T \dot{x}_a)^{\frac{1}{2}}}{(\dot{x}_a^T \dot{x}_a)^{\frac{1}{2}}}$$

$$\dot{v} = \frac{v}{V}$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{\dot{x}_U}{V} \right)$$

سازی ارائه شده‌است بخش (۴) نیز به بحث در مورد نتایج و نتیجه‌گیری پرداخته شده‌است.

۲- الگوریتم طراحی مسیر جهت فریب شبکه راداری

در این بخش ابتدا نحوه بیان روابط طراحی مسیر برای پهپادها جهت فریب شبکه راداری بر اساس مؤلفه طراحی مسیر بیان می‌شود. سپس تأثیر وجود نایقینی در موقعیت رادار بر ایجاد هدف مجازی به کمک پهپادهای همکار بررسی می‌شود. سپس نحوه شناسایی فریب توسط شبکه راداری مطرح می‌شود و پس از آن نحوه محاسبه حد پایین مؤلفه طراحی مسیر برای به حداقل رساندن احتمال شناسایی فریب بیان می‌گردد.

۲-۱- طراحی مسیر بهینه برای پهپادها بر اساس مؤلفه کمکی

در طراحی مسیر برای پهپادها، ابتدا یک مسیر برای هدف مجازی در ناحیه دید رادارها در نظر گرفته می‌شود [۱۰]. سپس با در نظر گرفتن معادلات دینامیکی و قیود حاکم بر حرکت پهپادها، مسیر مناسب برای پهپادها به گونه‌ای که روی خط واصل رادار و هدف مجازی قرار گیرند، طراحی می‌شود. مدل دینامیکی شش درجه آزادی پهپاد به صورت رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۰].

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_E \\ \dot{x}_N \\ \dot{x}_U \\ \dot{v} \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\chi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos \chi \cos \gamma \\ V \sin \chi \cos \gamma \\ V \sin \gamma \\ g[(T - D)/W - \sin \gamma] \\ (g/V)(k_n n \cos \mu - \cos \gamma) \\ gk_n n \sin \mu / V \cos \mu \end{bmatrix} \quad (1)$$

در این رابطه، سرعت (V) و زوایای مربوط به جهت حرکت پهپاد (γ, χ)، تعیین‌کننده حالت سامانه و (T, n, μ) ورودی‌های کنترلی هستند. T میزان نیرویی است که پهپاد برای تغییر شتاب نیاز دارد؛ n بیانگر نسبت نیروی بالابر پهپاد به نیروی گرانش حاصل از وزن پهپاد است و μ زاویه بین محور طولی پهپاد و محور افقی در هنگام پرواز پهپاد است. به عنوان مثال، وقتی پهپاد در یک موقعیت کاملاً افقی پرواز می‌کند، μ صفر است. در رابطه (۱)، D نیروی پسا^۱ است و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

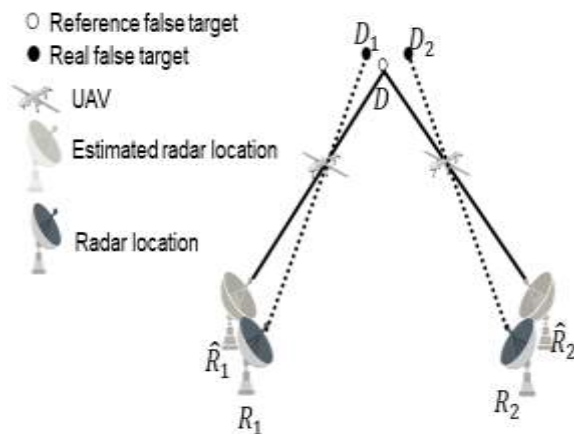
$$D = 0.5 \rho V^2 S C_{D0} + \frac{2kk_n^2 n^2 W^2}{\rho V^2 S} \quad (2)$$

^۱ Drag force

الگوریتم sqp استفاده شده است علت استفاده از الگوریتم sqp سرعت بالای این الگوریتم در حل مسئله بهینه‌سازی است [۱۶].

۲-۲- اثر نایقینی در موقعیت رادار برای جاد هدف مجازی

در صورتی که موقعیت دقیق رادارها دانسته شود، پهپادها با حرکت روی مسیر طراحی شده برای آنها می‌توانند یک هدف مجازی واحد را به شبکه راداری القا کنند. اما وجود نایقینی در موقعیت رادارها موجب می‌شود تا اهداف مجازی ایجاد شده توسط پهپادها دقیقاً یکی نباشد. بدون تأثیر بر کلیت تحلیل ارایه شده، فرض می‌شود که دو پهپاد سعی در فریب شبکه راداری شامل دو رادار را دارند. شکل (۲) تأثیر نایقینی در موقعیت رادارها را در ایجاد هدف مجازی نشان می‌دهد. در شکل (۲) موقعیتی که در مرحله شناسایی برای رادارها محاسبه شده است به صورت کم رنگ نشان داده شده است. لذا طراحی مسیر بر اساس این موقعیت نادقیق رادارها به گونه‌ای برای پهپادها انجام می‌گیرد تا هدف مجازی در موقعیت D ایجاد شود. اما توجه به موقعیت واقعی رادارها (به صورت رادارهای پر رنگ در شکل (۲) نشان داده شده است). هدف مجازی برای رادارهای یک و دو در موقعیت D₁, D₂ ایجاد می‌شود. شبکه راداری با استفاده از فاصله بین D₁, D₂ می‌تواند فریب را تشخیص دهد.



شکل (۲): تأثیر نایقینی در موقعیت رادار بر موقعیت هدف مجازی. در این شکل دایره‌ی تو خالی هدف مجازی است که با توجه به مقدار تخمینی برای موقعیت رادار محاسبه شده است. دایره‌های توپر هدف‌های مجازی هستند که به علت نایقینی در موقعیت رادار ایجاد شده‌اند. در این شکل Estimated radar location موقعیت فرضی رادار از دید پهپاد است.

$$\chi = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{x}_N}{\dot{x}_E} \right)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\left[\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\dot{x}_U}{V} \right)^2}} \right] (\ddot{x}_U V - \dot{x}_U \dot{V})}{V^2}$$

$$\dot{\chi} = \frac{\left\{ \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\dot{x}_N}{\dot{x}_E} \right)^2 \right]} \right\} (\ddot{x}_N \dot{x}_E - \ddot{x}_E \dot{x}_N)}{\dot{x}_E^2} \quad (5)$$

همچنین متغیرهای کنترلی نیز به صورت رابطه (۶) بر اساس مؤلفه طراحی مسیر قابل بیان است.

$$\tan \mu = \frac{\left[\frac{\dot{\chi}(V \cos \gamma)}{g} \right]}{\left[\frac{\dot{\gamma} V}{g} + \cos \gamma \right]}$$

$$n = \begin{cases} \frac{\dot{\chi}(V \cos \gamma)}{g k_n \sin \mu} & \text{if } \sin \mu \neq 0 \\ \frac{\dot{\gamma} V + g \cos \gamma}{g k_n \cos \mu} & \text{if } \cos \mu \neq 0 \end{cases}$$

$$T = W \left(\sin \gamma + \frac{\dot{V}}{g} \right) + D \quad (6)$$

با استفاده از روابط (۳) و (۴) می‌توان تمامی متغیرها را رابطه (۱) را بر حسب مؤلفه v بازنویسی کرد (روابط ۵ و ۶). بر این اساس با تعیین مؤلفه v می‌توان تمامی متغیرهای حالت و کنترلی در رابطه (۱) را محاسبه کرد. به عبارت دیگر، ابعاد مؤلفه مسئله طراحی مسیر به یافتن مؤلفه v تقلیل می‌یابد. مقدار مناسب برای مؤلفه v را می‌توان به کمک بهینه‌سازی و تابع هزینه مناسب محاسبه کرد. در این پژوهش از تابع هزینه بیان شده در رابطه (۷) استفاده شده است. این تابع هزینه، انرژی مصرفی پهپادها را کمینه می‌کند.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} T^2 dt \quad (7)$$

برای حل مسئله بهینه‌سازی ابتدا متغیر v و تابع هزینه به روشی مناسب گسسته‌سازی می‌گردند و سپس با استفاده از یک ابزار برنامه‌ریزی غیرخطی^۱ می‌توان آن را حل نمود. در این مطالعه، متغیر v در نقاط لاگرانژ-گوس-لوباتو^۲ گسسته‌سازی شده است. با استفاده از این روش گسسته‌سازی، مشتق‌های موجود در روابط بیان شده در (۴-۶) به راحتی و به کمک ماتریس مشتق قابل محاسبه است [۸]. برای حل این مسئله از ابزار برنامه‌ریزی غیرخطی fmincon در جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم افزار Matlab و

^۱Nonlinear programming

^۲Legendre-Gauss-Lobatto (LGL)

سپس جهت تشخیص هدف مجازی از هدف واقعی، از فاصله بین دو توزیع^۲ به صورت رابطه (۱۳) استفاده می شود.

$$\eta = V^T Q^{-1} V \quad (13)$$

مرز تشخیص به صورت رابط Z زیر مشخص می گردد [۱۰].

$$\begin{cases} \eta \leq \chi_{\alpha}^2(2) & H_0 \text{ establish} \\ \eta > \chi_{\alpha}^2(2) & H_1 \text{ establish} \end{cases} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، $\chi_{\alpha}^2(2)$ توزیع chi-square با درجه آزادی دو است. α نشان دهنده (p-value (probability) و برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. لذا مقدار $\chi_{\alpha}^2(2) = 0.106$ محاسبه می شود. اگر شرط H_0 برقرار باشد، شبکه راداری قادر به تشخیص فریب نخواهد بود. در غیر این صورت شبکه راداری فریب را تشخیص خواهد داد.

با توجه به مباحث مطرح شده در بخش (۲-۱) طراحی مسیر برای پهپادها به یافتن مؤلفه طراحی مسیر (v) برای پهپادها منجر شد. در ادامه محدوده مناسب برای مؤلفه طراحی مسیر جهت به حداقل رساندن احتمال شناسایی فریب توسط شبکه راداری محاسبه خواهد شد.

۲-۴- حد پایین مؤلفه طراحی مسیر جهت به حداقل رساندن احتمال شناسایی فریب

با توجه به شکل (۳) دیده می شود که هر چه نسبت فاصله پهپاد تا رادار به فاصله هدف مجازی تا رادار (مؤلفه v) بیشتر باشد، اثر نایقینی در موقعیت رادار بر ایجاد هدف مجازی کمتر می شود. در این بخش به دنبال یافتن حد پایین برای مؤلفه v هستیم تا با فرض دانستن حداکثر نایقینی و میزان دقت رادار، احتمال شناسایی فریب حداقل شود. در ابتدا باید رابطه مؤلفه v و میزان نایقینی در موقعیت رادار و فاصله بین اهداف مجازی مشخص شود. شکل (۳) یک نمای دو بعدی از این مؤلفه ها را نشان می دهد. در شکل (۳) فاصله پهپاد تا هدف مجازی مرجع و هدف مجازی واقعی که با ایجاد تأخیر در سیگنال رادار توسط پهپاد ایجاد شده است برابر هستند (روی شکل با a مشخص شده است). فاصله بین پهپاد تا موقعیت واقعی رادار (R) و فاصله پهپاد تا موقعیت تخمینی رادار (\hat{R}) لزوماً با هم برابر نیستند (لزوماً $b=c$ نیست). اما اگر $(b, c \gg \Delta R)$ باشد می توان تقریباً c را برابر فرض کرد. با این فرض و با توجه به شکل (۳)، فاصله بین هدف مجازی ایجاد شده توسط پهپاد با هدف مجازی مرجع (فاصله بین

۲-۳- تشخیص هدف مجازی توسط شبکه راداری

با فرض اینکه رادارها در موقعیت (x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri}) قرار داشته باشند، موقعیت هدف مجازی از دید هر یک از رادارها توسط $(R_i, \theta_i, \varphi_i)$ مشخص می شود که R_i فاصله از رادار تا هدف مجازی، θ_i زاویه سمت^۱ و φ_i زاویه فراز^۲ مربوط به رادار نام است. موقعیت هدف مجازی در دستگاه کارتزین به صورت رابطه (۸) بیان می شود.

$$\begin{cases} x_{pi} = R_i \cos \theta_i \cos \varphi_i + x_{Ri} \\ y_{pi} = R_i \sin \theta_i \cos \varphi_i + y_{Ri} \\ z_{pi} = R_i \sin \varphi_i + z_{Ri} \end{cases} \quad (8)$$

با مشتق گیری از رابطه (۸) رابطه (۹) حاصل می شود.

$$\begin{bmatrix} dx_{pi} \\ dy_{pi} \\ dz_{pi} \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} dR_i \\ d\theta_i \\ d\varphi_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

در این رابطه، A_i به صورت رابطه (۱۰) است.

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i \cos \varphi_i & -R_i \sin \theta_i \cos \varphi_i & -R_i \cos \theta_i \sin \varphi_i \\ \sin \theta_i \cos \varphi_i & R_i \cos \theta_i \cos \varphi_i & -R_i \sin \theta_i \sin \varphi_i \\ \sin \theta_i & 0 & R_i \cos \varphi_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

با استفاده از روابط (۹، ۱۰) خطای موقعیت هدف مجازی در مختصات قطبی به مختصات کارتزین انتقال می یابد. با فرض اینکه خطای موقعیت هدف مجازی در مختصات قطبی از توزیع گوسی با میانگین صفر و واریانس $\sigma_{Ri}^2, \sigma_{\theta i}^2, \sigma_{\varphi i}^2$ پیروی می کند، توزیع مربوط به خطای موقعیت هدف مجازی در مختصات کارتزین با توجه به ویژگی واریانس یک توزیع گوسی با میانگین صفر خواهد بود. در این حالت ماتریس کوواریانس به صورت رابطه (۱۱) محاسبه می شود.

$$Q_i = A_i \begin{bmatrix} \sigma_{Ri}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta i}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\varphi i}^2 \end{bmatrix} A_i^T \quad (11)$$

لذا با فرض اینکه خطای تخمین موقعیت هدف مجازی برای رادارها از یکدیگر مستقل هستند، ماتریس کوواریانس برای اختلاف موقعیت هدف مجازی تخمین زده شده توسط رادار یک و دو توسط رابطه (۱۲) محاسبه می شود.

$$V = \begin{bmatrix} x_{p1} - x_{p2} \\ y_{p1} - y_{p2} \\ z_{p1} - z_{p2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$Q = E[V \cdot V^T] = Q_1 + Q_2$$

³Mahalanobis distance

¹azimuth
²elevation

مجازی است و در راستایی که رادار بیشترین دقت را دارد، از v بدترین حالت ممکن در نظر گرفته شده است. اگر مقادیر ویژه ماتریس \hat{Q} از کوچک به بزرگ به ترتیب ξ_1, ξ_2 و ξ_3 در نظر یکدیگر فاصله دارند. به عبارت دیگر، برای یافتن حد پایین مؤلفه گرفته شده، با توجه به روابط (۱۳، ۱۴)، مقدار مؤلفه v از رابطه (۱۶) قابل محاسبه است.

$$(2d(V_{\xi_1}))\hat{Q}(2d(V_{\xi_1}))^T = \chi_{\alpha}^2(2) \quad (16)$$

در رابطه (۱۶)، V_{ξ_1} بردار ویژه متناظر با کوچکترین مقدار ویژه ماتریس \hat{Q} - یعنی جهتی که رادار بیشترین دقت را دارد - می باشد. رابطه (۱۶)، در واقع همان رابطه (۱۴) است که در آن برای محاسبه η از بردار $2d(V_{\xi_1})$ به جای بردار V استفاده شده است.

از آنجایی که در محاسبه حد پایین مؤلفه v از حداکثر فاصله ممکن بین اهداف مجازی استفاده شده و همچنین این فاصله در راستایی که رادار بیشترین قدرت تفکیک را دارد در نظر گرفته شده است، ممکن است در محاسبه مسیر بهینه برای پهپادها پاسخی یافت نشود که بتواند قیود مسئله را ارضا کند. در چنین حالتی می توان قید را نرم تر کرد و حد پایین مؤلفه v را نسبتی از حد پایین به دست آمده به کمک دو بردار ویژه متناظر با دو مقدار ویژه کوچکتر ماتریس \hat{Q} در نظر گرفت (رابطه (۱۷)).

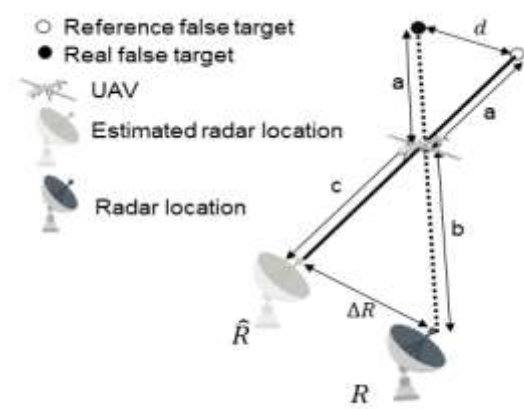
$$v = (1 - \lambda)v_{\xi_1} + \lambda v_{\xi_2} \quad (17)$$

در این رابطه $0 < \lambda \leq 1$ یک ضریب و v_{ξ_1} حد پایین به دست آمده به کمک جهت متناظر با کوچکترین مقدار ویژه و v_{ξ_2} حد پایین محاسبه شده به کمک جهت متناظر با مقدار ویژه دوم است. در شکل (۴) الگوریتم طراحی مسیر ارائه شده در این پژوهش آورده شده است. پس از طراحی مسیر مناسب برای هدف مجازی، این مسیر به همراه موقعیت پهپادها به بلوک محاسبه حد پایین برای مؤلفه طراحی مسیر داده می شود. سپس حد پایین محاسبه شده در این بلوک به عنوان قید به مسئله بهینه سازی اعمال می شود تا مسیر مناسب برای پهپادها که احتمال شناسایی فریب را حداقل می کند، محاسبه شود. اگر مسیر مناسب برای پهپاد یافت نشود، از مقدار λ کاسته می شود تا قید نرم تر شود. میزان کاسته شدن از مقدار λ قابل تنظیم است. اگر به ازای هیچ مقداری از λ پاسخ قابل قبول برای مسیر پهپادها که بتواند قیود مسئله را ارضا کند یافت نشد، الگوریتم جهت تغییر مسیر هدف مجازی و یا ارتقاء پهپاد به بلوک اول ارجاع داده می شود.

دایره های توپیر و توخالی از رابطه (۱۵) با دانستن حداکثر نایقینی در موقعیت رادار (ΔR) محاسبه می شود.

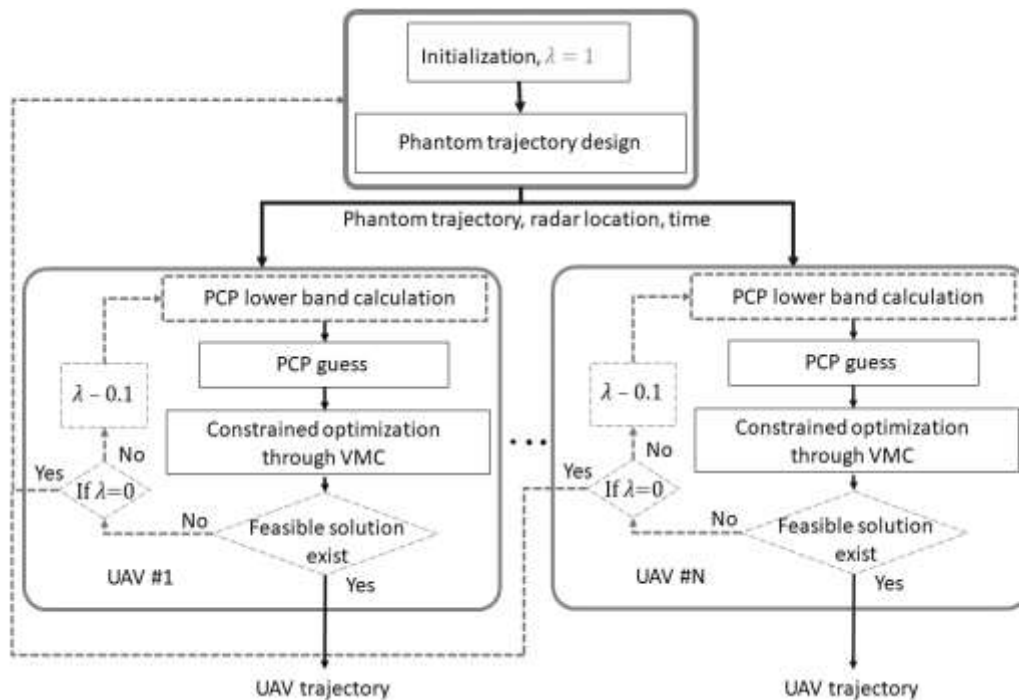
$$d = \Delta R * \frac{1 - v}{v} \quad (15)$$

از آنجایی که هدف یافتن فاصله بین اهداف مجازی ایجاد شده توسط پهپادها است و d فاصله بین هدف مجازی و هدف مجازی مرجع است، لذا در بدترین حالت مقدار $2d$ را به عنوان حد بالای فاصله بین اهداف مجازی در نظر گرفته می شود. در بخش نتایج نشان داده شده است که مقدار $2d$ به درستی حد بالای فاصله بین اهداف مجازی را نشان می دهد.



شکل (۳): رابطه بین نایقینی در موقعیت رادار و فاصله بین هدف مجازی ایجاد شده توسط پهپاد و هدف مجازی مرجع. در این شکل Estimated radar location موقعیت فرضی رادار از دید پهپاد است.

پس از محاسبه حد بالای فاصله بین اهداف مجازی، اگر این فاصله در محدوده نایقینی شبکه راداری قرار داشته باشد، شبکه راداری قادر به تشخیص فریب نخواهد بود. جهت تخمین محدوده نایقینی شبکه راداری، ابتدا ماتریس کوواریانس تخمین (ماتریس Q در رابطه (۱۲)) باید محاسبه شود. برای محاسبه ماتریس Q به محاسبه ماتریس A نیاز است. ماتریس A به موقعیت هدف مجازی ایجاد شده توسط پهپادها بستگی دارد. از آنجایی که یافتن حد پایین مؤلفه v پیش از طراحی مسیر برای پهپادها انجام می گیرد لذا هنوز اطلاعاتی در مورد موقعیت پهپادها وجود ندارد. برای حل این مشکل می توان از موقعیت هدف مجازی مرجع به عنوان تخمینی از موقعیت هدف مجازی ایجاد شده توسط پهپادها استفاده کرد. پس از محاسبه ماتریس کوواریانس خطای تخمین به کمک موقعیت هدف مجازی مرجع (\hat{Q})، با محاسبه مقادیر ویژه و بردارهای ویژه، جهتی که رادار بیشترین دقت را دارد محاسبه می شود. سپس فرض می شود که اهداف مجازی به اندازه $2d$ که حد بالای فاصله بین اهداف



شکل (۴): بلوک دیاگرام طراحی مسیر برای پهپادهای همکار جهت فریب شبکه راداری. در قسمت اول مسیر هدف مجازی طراحی می‌شود. این مسیر می‌تواند به کمک بهینه‌سازی محاسبه شود و یا به صورت پیش فرض در نظر گرفته شود. در بخش دوم ابتدا با توجه به مسیر هدف مجازی، حد پایین مؤلفه طراحی مسیر محاسبه می‌شود و سپس مسیر حرکت پهپادها طراحی می‌شود. در صورت نبود پاسخ قابل قبول برای مسیر پهپادها، از مقدار λ کاسته می‌شود. در صورتی که به ازای $\lambda = 0$ پاسخ قابل قبول وجود نداشت، مسئله جهت اصلاح مسیر هدف مجازی و یا ارتقاء پهپادها به بخش اول ارجاع می‌شود. قسمت‌های خط چین، نوآوری این پژوهش را نشان می‌دهد.

برای پهپاد دوم $0.1/85 < v < 0.3$ می‌باشد. مقدار اولیه مؤلفه v برای پهپاد اول $0.1/6$ و برای پهپاد دوم نیز $0.1/6$ در نظر گرفته شده است. مقادیر موقعیت و دقت رادارها مطابق با مرجع [۱۴] انتخاب شده است. موقعیت واقعی رادارهای یک و دو نسبت به موقعیت تخمینی رادارها $(0.1, 0.0, 0.0)$ و $(0.1, 0.0, 0.0)$ متر در نظر گرفته شده است. قیود لحاظ شده در حل مسئله کنترل بهینه در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): قیود در نظر گرفته شده در طراحی مسیر

متغیر	نام	قید
T	Thrust	$T < 230.234 \text{ N}$
n	Load factor	$-1/5 < n < 1/5$
μ	Bank angle	$-25^\circ < \mu < 25^\circ$
v	speed	$0 < v < 200 \text{ m/s}$
γ	flight path angle	$-15^\circ < \gamma < 15^\circ$
χ	heading angle	$-15^\circ < \chi < 15^\circ$
$\dot{\gamma}$	Flight path angle derivative	$-2^\circ/s < \dot{\gamma} < 2^\circ/s$
$\dot{\chi}$	Heading angle derivative	$-2^\circ/s < \dot{\chi} < 2^\circ/s$

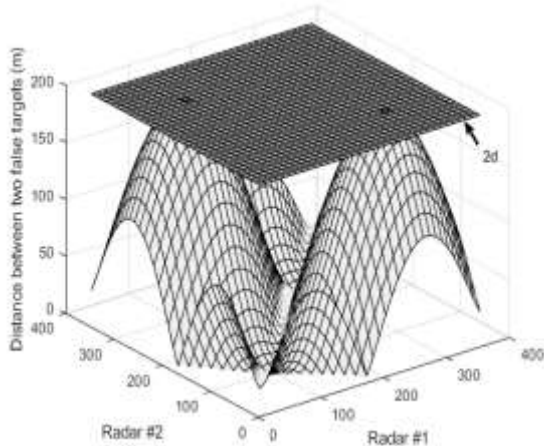
۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش به ارایه نتایج حاصل از شبیه‌سازی پرداخته خواهد شد. ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی فریب شبکه راداری شامل دو رادار توسط دو پهپاد ارایه شده و اثر نایقینی در موقعیت رادارها بررسی خواهد شد. سپس نتایج حاصل از اعمال قید محدود کننده مؤلفه طراحی مسیر ارایه می‌شود. همچنین اثر در نظر گرفتن قید پیشنهادی در احتمال تشخیص فریب با نتایج الگوریتم پایه مقایسه شده است. جهت بررسی احتمالاتی نتایج از روش مونت کارلو استفاده شده است.

۳-۱- ایجاد هدف مجازی

فرض می‌شود که رادار یک در موقعیت $(0, -20, 5)$ و رادار دو در موقعیت $(0, -15, 60)$ کیلومتر قرار دارد. موقعیت اولیه هدف مجازی $(2, -6, 25)$ کیلومتر و بردار سرعت آن $(2, 100, 200)$ متر بر ثانیه است. همچنین فرض می‌شود که هر دو رادار دقت یکسانی دارند و خطای اندازه‌گیری رادار از یک توزیع گوسی با میانگین صفر پیروی می‌کند. برای هر دو رادار $(0.8^\circ, 0.8^\circ, 50 \text{ m})$ به ترتیب انحراف معیار خطای فاصله، خطای زاویه سمت و فراز است. بازه تغییرات مؤلفه v برای پهپاد اول $0.1/85 < v < 0.3$ و

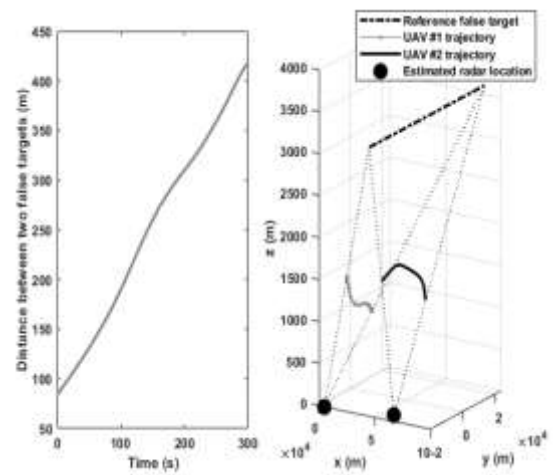
مشخص فاصله ایجاد شده بین اهداف مجازی کمتر از $2d$ است. این نتیجه به ازای تمام مقادیر v صادق است.



شکل (۶): در این شکل فاصله بین اهداف مجازی به ازای موقعیت‌های مختلف رادارها روی مرز ناحیه‌ای به شعاع 100 m حول موقعیت تخمینی رادارها به ازای $v = 0.5$ رسم شده است. صفحه‌ی ترسیم شده، مقدار $2d$ را نشان می‌دهد.

در شکل (۷) حد پایین مؤلفه v به ازای تمامی جهت‌های متناظر با مقادیر ویژه ماتریس کوواریانس خطای رادار رسم شده است. ناحیه ۱، ناحیه بین حد بالای مؤلفه طراحی مسیر و حد پایین محاسبه شده به کمک جهت متناظر با کوچکترین مقدار ویژه ماتریس کوواریانس خطای رادار را نشان می‌دهد. ناحیه بین دو حد پایین محاسبه شده توسط دو مقدار ویژه کوچک ماتریس کوواریانس با عدد ۲ نشان داده شده است. همچنین ناحیه بین دو حد پایین محاسبه شده توسط بزرگترین مقدار ویژه و مقدار ویژه میانی ماتریس کوواریانس خطای رادار با عدد ۳ مشخص شده است با حرکت از سمت ناحیه ۱ به طرف ناحیه ۴ احتمال شناسایی فریب در حضور نایقینی در موقعیت رادار افزایش می‌یابد. ناحیه ۵ محدوده غیرمجاز است زیرا پهپاد نمی‌تواند بیش از حد به هدف مجازی نزدیک شود. حد بالا و پایین مؤلفه طراحی مسیر که در پژوهش‌های پیشین در نظر گرفته می‌شده توسط خطوط خط چین نشان داده شده است. ناحیه ۱ براساس در نظر گرفتن بدترین شرایط محاسبه شده است. لذا با طراحی مسیر پهپاد در این ناحیه با ضریب اطمینان بالایی می‌توان گفت که فریب توسط شبکه راداری تشخیص داده نخواهد شد. اما این ناحیه به دلیل نزدیک بودن به حد بالای مؤلفه طراحی مسیر، ممکن است در برخی حالات منجر به پاسخ قابل قبول که قیود مسئله را ارضا کند نشود. در چنین حالتی پیشنهاد شد که مسیر پهپادها می‌تواند وارد ناحیه ۲ که از رابطه (۱۷) حاصل می‌شود نیز بشود.

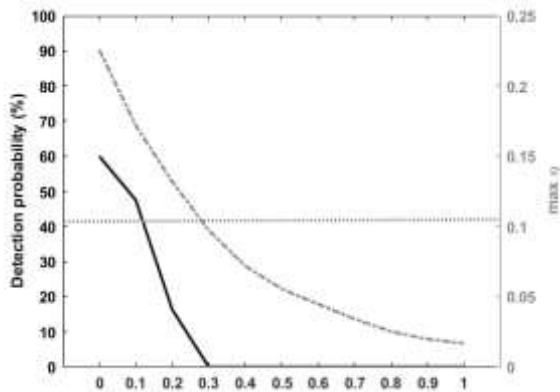
شکل (۵) مسیر حرکت پهپادها، هدف مجازی مرجع و موقعیت تخمینی رادارها را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که در صورت دقیق بودن موقعیت رادارها، مسیر مجازی ایجاد شده برای هر دو رادار یکسان خواهد بود و هر دو رادار مسیر حرکت هدف مجازی مرجع را خواهند دید. مسیر اهداف مجازی ایجاد شده توسط پهپادها در حالتی که نایقینی در موقعیت رادار وجود دارد جهت جلوگیری از شلوغ شدن شکل، در این شکل ترسیم نشده است اما فاصله بین اهداف مجازی در شکل (۵) نشان داده شده است. اگر این فاصله از ناحیه خطای تخمین رادار خارج شود، شبکه راداری قادر به تشخیص فریب خواهد بود.



شکل (۵): در شکل سمت راست مسیر هدف مجازی و مسیر طراحی شده برای پهپادها در فضای سه بعدی برای حالتی که در موقعیت رادارها نایقینی وجود ندارد نشان داده شده است. شکل سمت چپ فاصله ایجاد شده بین اهداف مجازی در حضور نایقینی در موقعیت رادار را نشان می‌دهد.

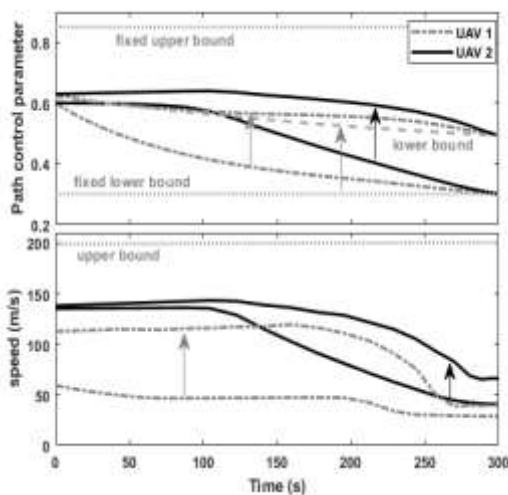
۲-۳- محاسبه حد پایین برای مؤلفه طراحی مسیر

در ابتدا نشان داده می‌شود که مقدار $2d$ که در بخش (۲) گفته شد به درستی حد بالای فاصله بین اهداف مجازی به ازای یک v مشخص $v = 0.5$ است. شکل (۶) این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد. در رسم این شکل یک ناحیه نایقینی برای موقعیت رادارها به شعاع 100 m در نظر گرفته شده است فرض شده که موقعیت واقعی رادار در بدترین حالت یعنی روی مرز این ناحیه قرار دارد. در شکل (۶) موقعیت واقعی رادارها در شعاع 100 m و در موقعیت‌های مختلف (برحسب درجه) حول مقدار تخمینی، روی محورهای مختصات نشان داده شده است شکل (۶) نشان می‌دهد که به ازای تمامی ترکیب‌های ممکن برای موقعیت واقعی رادارها نسبت به موقعیت تخمینی برای رادارها، به ازای یک v

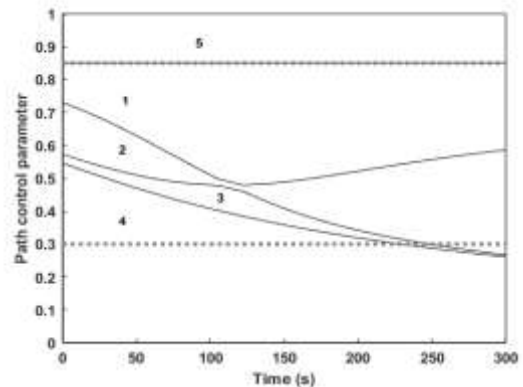


شکل (۸): میزان احتمال شناسایی و بیشینه مقدار η به ازای مقادیر مختلف برای λ . منحنی خط چین خاکستری رنگ مرز تشخیص شبکه راداری را نشان می‌دهد.

در شکل (۹) مقدار محاسبه شده برای مؤلفه طراحی مسیر و سرعت پهپادها به ازای $\lambda = 0/5$ و حالتی که حد پایین مؤلفه طراحی مسیر برابر با $0/3$ و ثابت باشد در این حالت به ازای $\lambda = 0/3$ حد پایین مؤلفه طراحی مسیر نسبت به مقدار ثابت $0/3$ افزایش می‌یابد که منجر به محدودتر شدن ناحیه مجاز برای پرواز پهپادها می‌شود. افزایش مقدار حد پایین مؤلفه طراحی مسیر به مقادیر بزرگتری برای مؤلفه طراحی مسیر منجر می‌شود. به عبارتی پهپاد به هدف مجازی نزدیکتر می‌شود. نزدیکتر شدن پهپاد به هدف مجازی منجر به افزایش سرعت پهپادها می‌شود که در شکل (۹) نشان داده شده‌است.



شکل (۹): مقایسه مؤلفه طراحی مسیر و سرعت پهپادها به ازای $\lambda = 0/5$ و مقدار ثابت $0/3$ برای حد پایین مؤلفه طراحی مسیر. مرزهای ثابت با خطوط نقطه چین و حد پایین محاسبه شده به کمک $\lambda = 0/5$ توسط خط چین نشان داده شده‌است. جهت فلش‌های رسم شده تغییر مسیر طراحی شده از حد پایین ثابت $0/3$ به $\lambda = 0/5$ را نشان می‌دهد.



شکل (۷): نواحی مجاز برای حرکت پهپادها براساس مؤلفه طراحی مسیر. حد پایین ناحیه ۱ به کمک بردار ویژه متناظر با کوچکترین مقدار ویژه ماتریس کوواریانس خطای رادار محاسبه شده‌است حد پایین نواحی ۲ و ۳ به ترتیب توسط مقدار ویژه میانی و بزرگترین مقدار ویژه ماتریس کوواریانس خطای رادار محاسبه شده‌است. با حرکت از ناحیه ۱ به سمت ۴ احتمال شناسایی فریب افزایش می‌یابد. ناحیه ۵ محدوده غیرمجاز است. خطوط خط چین حد پایین و بالای مؤلفه طراحی مسیر در پژوهش‌های پیشین را نشان می‌دهد.

در شکل (۸) به ازای مقادیر مختلف λ برای محاسبه حد پایین مؤلفه ۷، نتایج حاصل برای بیشینه مقدار η و احتمال شناسایی نشان داده شده‌است برای محاسبه احتمال شناسایی و مقدار بیشینه η از روش مونت کارلو^۱ استفاده شده‌است برای انجام این شبیه‌سازی، ناحیه نایقینی در موقعیت رادار ناحیه‌ای به شعاع ۱۰۰ m حول مقدار تخمینی در نظر گرفته شده‌است فرض شده‌است که موقعیت واقعی رادار در بدترین حالت یعنی روی مرز ناحیه نایقینی قرار دارد. سپس ۵۰ موقعیت مختلف روی مرز ناحیه به صورت تصادفی به عنوان موقعیت واقعی رادار فرض شده‌است برای هر کدام از این موقعیت‌ها نیز ۵۰ بار شبیه‌سازی انجام گرفته تا اثر خطای رادار نیز به خوبی در نظر گرفته شود. لذا به ازای هر مقدار از λ تعداد ۲۵۰۰ بار شبیه‌سازی انجام گرفته و نتایج در شکل (۸) خلاصه شده‌است نتایج نشان می‌دهد که تا مقدار $\lambda = 0/3$ نیز احتمال شناسایی صفر است و به ازای مقادیر کوچکتر λ احتمال شناسایی افزایش می‌یابد. مقدار بیشینه η نیز نشان می‌دهد که با کاهش مقدار λ به مرز تشخیص فریب نزدیکتر می‌شویم. لذا با توجه به این نتایج و توجه به این نکته که در این شبیه‌سازی نیز بدترین حالت در نظر گرفته شد، به نظر می‌رسد که ناحیه ۲ در شکل (۷) نیز می‌تواند جهت طراحی مسیر مورد استفاده قرار بگیرد. به ازای نواحی پایینتر از ناحیه ۲ در شکل (۷) طراحی مسیر دارای ضریب اطمینان پایینی خواهد بود.

^۱ Monte carlo method

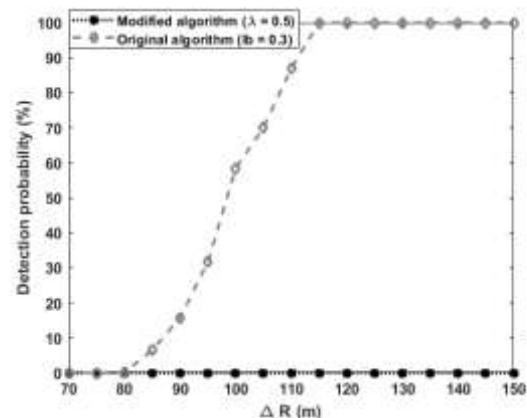
قادر به تشخیص فریب خواهد بود. یکی از راهکارهایی که می‌توان جهت کاهش فاصله بین اهداف مجازی و کاهش احتمال شناسایی فریب اتخاذ کرد، افزایش مقدار مؤلفه طراحی مسیر است. افزایش بیش از حد مقدار مؤلفه v ، پهنادهای را به مرز محدودیت‌های فیزیکی آنها سوق می‌دهد، زیرا به‌طور کلی هرچه پهنادها به هدف مجازی نزدیکتر باشد نیاز به توان بیشتر و سرعت بیشتری برای دنبال کردن هدف مجازی دارد. با اتخاذ تابع هزینه و حد بالای مناسب جهت محاسبه مؤلفه v می‌توان از افزایش بیش از حد این مؤلفه جلوگیری کرد. در این پژوهش از تابع هزینه مرتبط با انرژی پهنادهای استفاده شده‌است که مقدار مؤلفه v را به سمت حد پایین آن سوق می‌دهد.

کاهش مؤلفه v نیز منجر به افزایش فاصله بین اهداف مجازی می‌شود که احتمال شناسایی فریب را افزایش می‌دهد. در مطالعاتی که تا به حال صورت گرفته حد پایین برای مؤلفه طراحی مسیر یک مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شد. در این حالت طراح دید روشنی نسبت به مقدار مناسب برای حد پایین این مؤلفه نداشته و ممکن است به ازای مقدار انتخاب شده در یک بازه زمانی احتمال شناسایی فریب افزایش یابد. در این مقاله، راهکاری برای محاسبه حد پایین مؤلفه طراحی مسیر بر اساس حداکثر میزان نایقینی در موقعیت رادار، دقت رادار و مسیر هدف مجازی ارائه گردید. به‌عبارت دیگر، محدوده قابل پرواز برای پهنادهای با توجه به میزان نایقینی در موقعیت رادار، دقت رادار و مسیر هدف مجازی تعیین شد. از آنجایی که در محاسبه حد پایین این مؤلفه از حداکثر فاصله ممکن بین اهداف مجازی به ازای یک ناحیه نایقینی و جهتی که رادار بیشترین دقت را دارد استفاده شده‌است، ممکن است به ازای حد پایین محاسبه شده مسئله کنترل بهینه پاسخی که بتواند تمامی قیود مسئله را ارضا کند، نداشته باشد. راهکار پیشنهادی برای چنین شرایطی استفاده از نسبتی از حد پایین به‌دست آمده به کمک دو بردار ویژه متناظر با دو مقدار ویژه کوچک ماتریس کوواریانس خطای رادار می‌باشد.

اهمیت محاسبه حد پایین برای مؤلفه طراحی مسیر در کاربردهای بلادرنگ که مسیر هدف مجازی و پهنادهای در حین ماموریت محاسبه می‌شود، آشکارتر می‌شود [۱۱]. در چنین شرایطی حد پایینی که بتواند با شرایط مسئله تطبیق پیدا کند تا حد خیلی خوبی می‌تواند موفقیت ماموریت فریب را تضمین کند. همچنین درحالتی که طراحی مسیر پیش از ماموریت انجام شود، این حد پایینی می‌تواند به طراح در طراحی مسیر مناسب برای هدف مجازی کمک کند.

در بخش شبیه‌سازی، میزان نایقینی تا شعاع ۱۵۰ متر بررسی گردید. مسلماً با افزایش میزان نایقینی، ناحیه قابل پرواز برای

در شکل (۱۰) احتمال شناسایی فریب توسط شبکه راداری نسبت به میزان نایقینی در موقعیت رادار برای حالتی که حد پایین مؤلفه v ثابت و برابر با $0/3$ در نظر گرفته شده‌است و حالتی که حد پایین مؤلفه v با استفاده از رابطه (۱۷) و با در نظر گرفتن $\lambda = 0/5$ محاسبه شده، نشان داده شده‌است این شکل نشان می‌دهد که با ثابت در نظر گرفتن حد پایین مؤلفه v ، با افزایش میزان نایقینی احتمال شناسایی نیز افزایش می‌یابد. در حالتی که حد پایین مؤلفه v با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه شده‌است، احتمال شناسایی حداقل ممکن است.



شکل (۱۰): احتمال شناسایی فریب توسط شبکه راداری به ازای مقادیر مختلف نایقینی در موقعیت رادار.

همان‌طور که گفته شد مقدار انتخاب شده برای میزان خطای رادار با توجه به منابع معتبر و به روز انتخاب شده [۱۴] و از آنجایی که در محاسبه حد پایین مؤلفه v بدترین شرایط در نظر گرفته شده‌است، لذا انتظار می‌رود که الگوریتم ارائه شده تا حدی نسبت به میزان خطای رادار مقاوم باشد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش به موضوع وجود نایقینی در موقعیت رادار و تأثیر آن بر طراحی مسیر پهنادهای ماموریت فریب شبکه راداری به کمک گروهی از پهنادهای همکار پرداخته شد. وجود نایقینی در موقعیت رادارها در مرحله شناسایی به دلایلی از قبیل نویز اندازه‌گیری الکترونیکی و خطای همگام‌سازی مشاهدات اجتناب‌ناپذیر است. در روش پیشنهادی، از مؤلفه کمکی طراحی مسیر مطابق روش پیشنهادی در [۱۰] جهت طراحی مسیر پهنادهای استفاده شد. کاهش ابعاد مؤلفه‌ای مسئله و حذف قید تساوی از جمله مزایای استفاده از این مؤلفه در طراحی مسیر برای پهنادهای است.

در صورتی که نایقینی در موقعیت رادارها از یک حد مشخصی بیشتر باشد، شبکه راداری با توجه به فاصله بین اهداف مجازی

- trajectory design. In AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit," p. 6348, 2007.
- [9] Y. Xu and G. Basset, "Pre and post optimality checking of the virtual motion camouflage based nonlinear constrained subspace optimal control. In AIAA guidance, navigation, and control conference," p. 5991, 2009.
- [10] Y. Xu and G. Basset. "Virtual motion camouflage based phantom track generation through cooperative electronic combat air vehicles. Automatica," vol. 46, pp.1454-1461, 2010.
- [11] Y. Xu, and G. Basse, "Real-time optimal coherent phantom track generation via the virtual motion camouflage approach. Journal of dynamic systems, measurement, and control," vol.13, 2011.
- [12] Z. Ouyang, C. Xu, J. Feng, and B. Wang. "Research on Method of Phantom Track Generation Based on Cooperative Control of UAVs in Uniform Linear Motion," In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering vol. 685, no. 1, p. 2018, 2019.
- [13] C. Feng, Q. Feng, and H. Li. "A Flight Path Planning for Cooperative Generation of a Phantom Radar Track," 37 th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2018.
- [14] X. Liu and D. Li, "A Three-Dimensional Phantom Track Generation for Radar Network Deception," IEEE Access, vol. 7, pp. 27288-27301, 2019.
- [15] K. B. Purvis, K.J. Astrom, and M. Khammash. Estimation and optimal configurations for localization using cooperative UAVs. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 16(5), pp.947-958, 2008.
- [16] دهقان، سید محمد مهدی، فریب شبکه ی راداری به کمک گروهی از پهپادهای همکار، هفتمین کنفرانس رادار و سامانه های مراقبتی ایران، تهران، ۱۳۹۹.
- [17] K. B. Purvis, K. J. Astrom, and M. Khammash, "Estimation and optimal configurations for localization using cooperative UAVs," vol.16, pp. 947-958, 2008.

پهپادها جهت اجرای ماموریت فریب شبکه راداری کاهش یافته و احتمال شناسایی فریب افزایش می یابد. در حال حاضر مطالعاتی در حوضه شناسایی موقعیت رادار به کمک همکاری گروهی پهپادها صورت گرفته است [۱۷]. لذا می توان اجرای هم زمان ماموریت شناسایی و فریب توسط دسته پهپادهای همکار را در کارهای آتی مورد بررسی قرار داد. اجرای هم زمان ماموریت شناسایی و فریب می تواند منجر به کاهش ناحیه نایقینی موقعیت رادار و افزایش ناحیه قابل پرواز برای پهپادها شود.

در این پژوهش مسیر هدف مجازی مرجع به صورت پیش فرض در نظر گرفته شد و لذا تنها به تأثیر مؤلفه طراحی مسیر در کاهش احتمال شناسایی فریب پرداخته شد. طراحی مسیر هدف مجازی مرجع نیز می تواند بر احتمال شناسایی فریب اثرگذار باشد، لذا می توان طراحی مناسب برای مسیر هدف مجازی مرجع را به عنوان کارهای پیش رو معرفی کرد. با طراحی مناسب برای مسیر هدف مجازی علاوه بر کاهش احتمال شناسایی فریب، می توان برخی از محدودیت های پهپادها را نیز به طراحی مسیر هدف مجازی مرجع منتقل کرد و فضای جستجو برای مسیر مناسب پهپادها را گسترش داد.

۵- مراجع

- [1] F. Andreas, J. Hasch, and Ch. Waldschmidt. "A cooperative MIMO radar network using highly integrated FMCW radar sensors", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.65, no.4, pp.1355-1366, 2017.
- [2] C. Yang, L. Feng, H. Zhang, S. He, and Z. Shi. A novel data fusion algorithm to combat false data injection attacks in networked radar systems. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, vol. 4, pp.125-136, 2018.
- [3] M. J. Mears and M. R. Akella, "Deception of radar systems using cooperatively controlled unmanned air vehicles," Proceedings. 2005 IEEE Networking, Sensing and Control. IEEE, 2005.
- [4] K. B. Purvis, P. R. Chandler, and M. Pachter. "Feasible flight paths for cooperative generation of a phantom radar track," Journal of guidance, control, and dynamics, vol. 29, pp.653-61, 2006.
- [5] M. Pachter, P. Chandler, R. Larson, and K. Purvis. "Concepts for generating coherent radar phantom tracks using cooperating vehicles. In AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit," p. 5334, 2004.
- [6] D. H. A. Maithripala and S. Jayasuriya, "Radar deception through phantom track generation. In Proceedings of the 2005, American Control Conference," pp. 4102-4106, 2005.
- [7] N. Dhananjay, D. Ghose, and A. Kuduvali. "Generation of a class of proportional navigation guided interceptor phantom tracks. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 38, pp. 2206-2215, 2015.
- [8] Y. Xu. "Virtual motion camouflage and suboptimal

Phantom track generation for radar network deception in the presence of inaccuracy in the radar position

M. M. Dehghan Bonadaki^{*}, A. KashaniNia

^{*} Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 07/04/2021, Accepted: 13/12/2021)

Abstract

Radar network deception through phantom track generation using cooperative unmanned aerial vehicles (UAVs) is an effective way of encountering sophisticated radar networks. In previous studies a method based on virtual motion camouflage (VMC) and path control parameter (PCP) has been developed to design the trajectory of cooperative UAVs during the phantom track generation mission. In these studies, the radar locations are assumed to be known. In real situations, the knowledge of radar locations has an inaccuracy. The radar position inaccuracy leads to an incoherent phantom track. The radar network can recognize the phantom track according to the distance between the false targets created by each UAV. In this paper, the effect of the inaccuracies of the radar position on the generated phantom track is considered. By adding a constraint that limits the flyable range of UAVs, the phantom track is generated such that the probability of the radar network detecting the deception is minimized. The mentioned constraint is specified based on the maximum radar position inaccuracy, the radar error, and the false target trajectory. The simulation results show that using this constraint in the trajectory design for UAVs, reduces effectively the recognition rate of the phantom track for various ranges of inaccuracies.

Keywords: Cooperative Unmanned Aerial Vehicle, Radar Network, Radar Deception, Phantom Track, Radar Position Inaccuracy

^{*} Corresponding author E-mail: smmd@mut.ac.ir