

# ارائه یک روش تصویر-مبنا و مستقل از پردازش نشانکهای سامانه رهیاب در تشخیص وقوع حملات تداخل پارازیت و ارزیابی صحت تعیین موقعیت مطلق پهپاد

علیرضا آفری<sup>۱\*</sup>، مسعود ورشوساز<sup>۲</sup>، محمد سعادت سرشت<sup>۳</sup>، برات مجردی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
arafary@mail.kntu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
varshosazm@kntu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
msaadat@ut.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار دانشکده عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران  
mojaradi@iust.ac.ir

(تاریخ دریافت اردیبهشت ۱۳۹۷، تاریخ تصویب مرداد ۱۳۹۷)

## چکیده

ارزیابی صحت عملکرد گیرنده‌های رهیاب (سیستم تعیین موقعیت جهانی، GPS<sup>۱</sup>)، در محیط‌های آلوده به نشانکهای<sup>۲</sup> تداخل پارازیت<sup>۳</sup> از اهمیت زیادی در حفظ امنیت پرواز پهپادها، به خصوص در کاربردهای نظامی برخوردار است. در حال حاضر روشهای موجود برای آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت و مقابله با آن، روشهای مبتنی بر پردازش نشانکهای سامانه رهیاب می‌باشند. روش ارائه شده در این مقاله برای آشکارسازی وقوع حملات تداخل پارازیت و ارزیابی صحت عملکرد رهیاب پهپاد، روشی مستقل از پردازش نشانکهای رهیاب می‌باشد. این روش یک روش تصویر-مبنا بوده و از تصاویر دوربین پهپاد که از مسیر پرواز اخذ شده اند برای این منظور استفاده می‌کند. مسیر پروازی طی شده توسط پهپاد با استفاده از روش تعیین مسیر بصری<sup>۴</sup> و از روی تصاویر پهپاد استخراج شده و از مقایسه این مسیر با مسیر پهپاد که از داده های رهیاب بدست می‌آید برای آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت و ارزیابی صحت عملکرد گیرنده رهیاب پهپاد استفاده می‌گردد. برای مقایسه این دو مسیر، دو توصیفگر مسیر فاصله بهنجار شده بین نقاط متوالی (NDCP<sup>۵</sup>) و زاویه بین امتدادهای متوالی (CDA<sup>۶</sup>) تعریف و از مقایسه این توصیفگرها با استفاده از شاخص تشابه کسینوسی، صحت عملکرد رهیاب پهپاد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه شده با استفاده از این توصیفگرها توانایی آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت و ارزیابی صحت عملکرد رهیاب پهپاد در حین پرواز را دارا بوده و با توجه به غیر فعال بودن حسگر دوربین، این روش تحت تاثیر نشانکهای خارجی و جنگ الکترونیک نخواهد بود.

**واژگان کلیدی:** پهپاد، رهیاب، تداخل پارازیت، تعیین مسیر بصری، توصیفگر مسیر

\* نویسنده رابط

<sup>۱</sup> Global Positioning System

<sup>۲</sup> Signal

<sup>۳</sup> Jamming

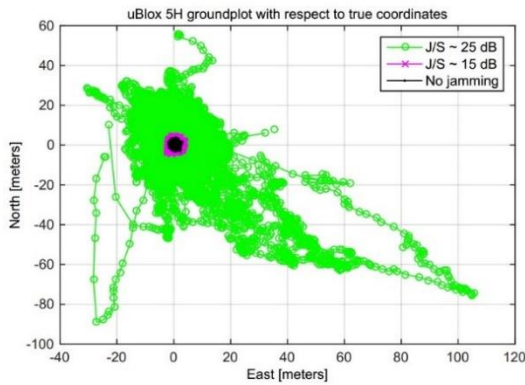
<sup>۴</sup> Visual Odometry

<sup>۵</sup> Normalized Distance of Consecutive Points

<sup>۶</sup> Consecutive Directions Angle

## ۱- مقدمه

ناوبری و هدایت پهپاد<sup>۱</sup> (پرنده هدایت پذیر از راه دور) در فضای باز<sup>۲</sup> با استفاده از گیرنده های سامانه<sup>۳</sup> رهیاب (سیستم تعیین موقعیت جهانی، GPS<sup>۴</sup>) و تلفیق آن با حسگرهای ارتفاع سنجی<sup>۵</sup> و واحد اندازه گیری لختی، IMU<sup>۶</sup>، انجام می شود [۳-۱]. با وجود ویژگیهای مناسب سامانه رهیاب برای ناوبری پهپادها، استفاده از آن با مشکلاتی نیز همراه است. توان دریافتی نشانکهای<sup>۷</sup> سامانه رهیاب در روی سطح زمین در حدود  $10^{-16}$  وات می باشد و به راحتی و بوسیله تداخل بسامدهای<sup>۸</sup> رادیویی<sup>۹</sup>، تخریب می گردد [۴، ۵]. به طور کلی در صورت وقوع تداخل بسامدی بین نشانکهای ناوبری با سایر نشانکهای رادیویی، تعیین موقعیت با سامانه های جهانی ناوبری ماهواره ای، GNSS<sup>۱۰</sup>، دچار مشکل می گردد. تداخل بسامدی یا باعث ایجاد خطا در تعیین موقعیت و زمان توسط گیرنده رهیاب شده و یا از دریافت نشانک توسط گیرنده و انجام تعیین موقعیت توسط آن جلوگیری می کنند [۶]. تداخل بسامد رادیویی ممکن است به صورت طبیعی توسط عواملی مانند طوفانهای خورشیدی و میدانهای مغناطیسی شدید و یا به طور عمدی توسط نشانکهای تداخل پارازیت<sup>۱۱</sup> و فریب<sup>۱۲</sup> و یا به صورت غیرعمدی توسط امواج رادیو تلویزیونی و سایر نشانکهای ناوبری ایجاد شود [۷، ۸]. اندازه خطای تعیین موقعیت در اثر تداخل پارازیت، به نوع گیرنده و امکانات جانبی آن، توان نشانک تداخل پارازیت و بازه زمانی وقوع تداخل پارازیت بستگی داشته و رفتار این خطا نیز به صورت اتفاقی می باشد [۶]. در [۹] خطایی در حدود چندین ۱۰km در تعیین موقعیت با رهیاب و در اثر تداخل پارازیت گزارش شده است که با استفاده از روش تلفیق حسگر رهیاب با حسگر واحد اندازه گیری لختی با روش فیلتر کالمن [۱۰] مقدار این خطا به حدود ۳۰۰m کاهش یافته است.



شکل ۱- توزیع خطای تعیین موقعیت رهیاب ثابت مدل uBlox 5H در حین تداخل پارازیت غیرمتحرک [۱۱]

شکل (۱) عملکرد یک گیرنده رهیاب تک بسامدی "u-blox 5H" را در مقابل نشانک تداخل پارازیت با توان ۲۵dB نشان می دهد. در این آزمایش، میانگین و انحراف معیار خطای تعیین موقعیت مسطحاتی برای یک گیرنده ثابت در ازای بیشینه توان ۲۵dB برای نشانک تداخل پارازیت به ترتیب برابر با  $9/2m$  و  $8/7m$  و نیز بیشینه خطا در حدود  $129/3m$  گزارش شده است [۶]. در حال حاضر همه روشهای ارائه شده برای تشخیص وقوع تداخل پارازیت و فریب در عملکرد رهیاب و نیز مقابله با آن به آنالیز نشانکهای دریافتی توسط گیرنده رهیاب متکی می باشند [۷، ۱۲]. در [۱۳] از وابستگی بین تغییرات ایجاد شده در مقادیر اندازه گیری شده نسبت توان چگالی نشانک حامل به نوفه<sup>۱۳</sup> در تشخیص وقوع تداخل پارازیت استفاده شده است. همچنین استفاده از پارامترهای مختلف مانند توان مطلق نشانکهای رهیاب، توان نسبی نشانکهای رهیاب، توان نشانک دریافتی از هر ماهواره، پایش تعداد نشانکهای دریافتی و کد شناسایی ماهواره ها، بازه های زمانی دریافت نشانک، مقایسه زمان رهیاب با یک زمان سنج مستقل دقیق و مقایسه مسیر حاصل از رهیاب با مسیر حاصل از شتاب سنج برای تشخیص وقوع فریب پیشنهاد شده است [۱۳]. در [۱۴] نحوه استفاده از داده های حسگرهای لختی، زمان و اثر دوپلر<sup>۱۴</sup> نشانک رهیاب به صورت مکانیزم های حافظه مبنا برای تشخیص وقوع فریب رهیاب، بیان و مورد ارزیابی قرار گرفته و نشان داده شده است که در صورت وقوع تداخل

<sup>۱</sup> UAV (Unmanned Aerial Vehicle)  
<sup>۲</sup> Outdoor  
<sup>۳</sup> System  
<sup>۴</sup> Global Positioning System  
<sup>۵</sup> Barometric Altimeter  
<sup>۶</sup> Inertial Measurement Unit  
<sup>۷</sup> Signal  
<sup>۸</sup> Frequency  
<sup>۹</sup> Radio Frequency Interference  
<sup>۱۰</sup> Global Navigation Satellite Systems  
<sup>۱۱</sup> Jamming  
<sup>۱۲</sup> Spoofing

<sup>۱۳</sup> Carrier-to-Noise density power ratio  
<sup>۱۴</sup> Doppler effect

مسیر بصری<sup>۲</sup>، VO، با استفاده از تصاویر پهپاد می‌باشد که جزئیات مربوط به روش در ادامه مقاله در بخش ۳ آورده شده است. حسن این روشها، امکان اجرای آنها در اکثر محیطها و استقلال تقریبی آنها از اطلاعات جانبی می‌باشد و عیب عمده این روشها، افزایش تدریجی خطای تعیین موقعیت و ایجاد انحراف<sup>۳</sup> و نیاز به مقاردهی اولیه سیستم مختصات و نیز مقیاس‌گذاری بردار جابجایی نسبی می‌باشد که به طور معمول از اطلاعات رهیاب و واحد اندازه‌گیری لختی برای این منظور استفاده می‌شود [۱۸].

ساختار ادامه مقاله به صورت زیر می‌باشد. ابتدا مروری کوتاه بر روشهای تعیین موقعیت بصری خواهیم داشت. سپس روشگان<sup>۴</sup> الگوریتم ارائه شده در این مقاله بیان خواهد شد. بخش بعدی نیز شامل ارزیابیها و نتایج بدست آمده می‌باشد و در نهایت بخش نتیجه‌گیری و منابع آورده شده‌اند.

## ۲- بررسی روشهای تصویر-مبنا در تعیین موقعیت و ناوبری پهپاد

استفاده از گیرنده رهیاب در پهپادها به منظور تعیین موقعیت پهپاد در یک سیستم مختصات جهانی و ناوبری آن می‌باشد. بنابراین این امکان وجود دارد که بتوان از سایر سایر روشهای تعیین موقعیت برای ارزیابی صحت عملکرد رهیاب استفاده کرد. تعیین موقعیت مطلق و نسبی پهپاد با استفاده از تصاویر اخذ شده توسط دوربین پهپاد قابل انجام می‌باشند. وجود هر دو روش تعیین موقعیت مطلق و نسبی در ایجاد یک سیستم ناوبری کامل برای کنترل پرواز پهپاد یا هواپیما لازم می‌باشد [۱۹].

تعیین موقعیت مطلق با استفاده از تصاویر پهپاد مستلزم استفاده از اطلاعات جانبی مانند تصاویر ماهواره‌ای، اطلاعات ارتفاعی یا لایه‌های برداری سیستمهای اطلاعات مکانی (GIS)<sup>۵</sup> می‌باشد. این کار با استفاده از هم مرجع نمودن تصاویر پهپاد به این اطلاعات مکانی انجام می‌شود. ارزیابی صحت عملکرد رهیاب پهپاد با هر دو روش تعیین موقعیت مطلق و نسبی و با استفاده از تصاویر پهپاد قابل اجرا می‌باشند که در ادامه مروری بر آنها خواهیم داشت.

پارازیت استفاده از سیستم ناوبری لختی، INS<sup>۱</sup>، و زمان‌سنجهای عادی جهت تشخیص وقوع فریب رهیاب ناکارآمد خواهد بود و برای استفاده از عامل زمان نیاز به زمان‌سنجهای دقیق می‌باشد و استفاده از اثر دوپلر برای تشخیص وقوع تداخل پارازیت به عنوان گزینه مناسب‌تر ارزیابی شده است. در [۹] از روش تلفیق حسگرهای رهیاب و واحد اندازه‌گیری لختی با حسگر دوربین بوسیله فیلتر کالمن برای مقابله با تداخل پارازیت در حالت ایستا استفاده شده و نشان داده شده که تلفیق حسگر رهیاب و حسگر واحد اندازه‌گیری لختی با حسگر دوربین به طور موثری می‌تواند میزان خطای تعیین موقعیت با رهیاب در زمان وقوع تداخل پارازیت را کاهش دهد. در این مقاله مقدار خطای تعیین موقعیت با رهیاب در صورت تلفیق با حسگر دوربین در حدود ۱۰۰m گزارش شده است [۹].

بطور کلی در حالتی که سیستم برای تشخیص و مقابله با تداخل پارازیت یا فریب تنها متکی به نشانکهای ورودی به گیرنده رهیاب باشد امکان پنهان‌کاری در اعمال تداخلهای بسامدی عمدی با استفاده از روشهای تکامل یافته‌تر پردازش نشانک وجود دارد [۱۲، ۱۵-۱۷]. این سیستمها روز به روز قوی‌تر و پنهان‌تر شده و مقابله با آنها نیز سخت‌تر می‌گردد. بنابراین برای ارزیابی عملکرد سیستم تعیین موقعیت رهیاب پهپاد، وجود روشی مستقل از ارتباطات بیرونی و مستقل از نشانکهای ورودی به گیرنده رهیاب ضروری می‌باشد [۷]. یکی از روشهای مناسب استفاده از روشهای تصویر-مبنا می‌باشد. با توجه به اینکه حسگر دوربین یک حسگر غیر فعال می‌باشد عملکرد آن مستقل از نشانکهای خارجی بوده و می‌توان از روشهای تصویر-مبنا برای ارزیابی عملکرد رهیاب استفاده کرد. تعیین موقعیت با استفاده از روشهای تصویر-مبنا هم به صورت مطلق و هم به صورت نسبی قابل انجام می‌باشد. البته با توجه به شرایط پرواز پهپاد استفاده از این روشها در اجرا با چالشهای متعددی مواجه می‌باشند که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد.

روشی که در این مقاله برای آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت و ارزیابی صحت عملکرد رهیاب ارائه می‌شود یک روش تصویر-مبنای تعیین موقعیت نسبی مبتنی بر تعیین

<sup>۲</sup> Visual Odometry

<sup>۳</sup> Drift

<sup>۴</sup> Methodology

<sup>۵</sup> Geospatial Information System

<sup>۱</sup> Inertial Navigation System

## ۲-۱- روشهای بصری در تعیین موقعیت مطلق

برای تعیین موقعیت مطلق پهپاد با استفاده از روشهای بصری، علاوه بر تصاویر پهپاد بسته به روش مورد استفاده برای تعیین موقعیت، نیاز به اطلاعات جانبی از قبیل مدل ارتفاعی زمین [۲۰-۲۴]، تصاویر هوایی یا ماهواره‌ای آرشیو و زمین مرجع شده [۲۰، ۲۵-۳۲]، اطلاعات مکانی برداری در سیستمهای اطلاعات مکانی از منطقه پرواز [۲۸، ۳۳، ۳۴]، و یا لیست ستارگان قابل رویت در منطقه پرواز می‌باشد [۲۰، ۲۸]. بسته به نوع اطلاعات جانبی مورد استفاده روشهای بصری تعیین موقعیت مطلق به چهار دسته قابل تقسیم هستند:

۱- روش استفاده از اطلاعات ارتفاعی

۲- روش تناظریابی بین تصاویر پهپاد و تصاویر زمین مرجع موجود

۳- روش تناظریابی بین اطلاعات برداری استخراج شده از تصاویر با اطلاعات نقشه ای موجود در سیستم های اطلاعات مکانی

۴- روش تعیین موقعیت سماوی و استفاده از موقعیت یاب ستاره ای<sup>۱</sup>

در روش اول با تناظریابی بین اطلاعات ارتفاعی بدست آمده از زوج تصاویر پوششی پهپاد با اطلاعات ارتفاعی موجود از منطقه پرواز در یک باند پروازی برای تعیین موقعیت مطلق پهپاد استفاده می‌شود. برای این منظور با استفاده از تصاویر تهیه شده توسط پهپاد یک سری نیمرخ<sup>۲</sup> های ارتفاعی از باند پروازی تهیه شده و با محاسبه همبستگی<sup>۳</sup> بین این نیمرخ های ارتفاعی با نیمرخ های ارتفاعی تهیه شده از اطلاعات آرشیو موقعیت پهپاد تعیین می‌گردد [۲۰-۲۴]. برای استفاده از این روش بایستی طول پایه هوایی<sup>۴</sup> بین تصاویر پوششی معلوم باشد تا مدل رقومی بدست آمده در مقیاس زمینی تعیین گردد.

در روش دوم جهت تعیین پارامترهای موقعیت و توجیه دوربین پهپاد در لحظه عکسبرداری، تصاویر پهپاد به تصاویر آرشیو و تصحیح هندسی شده موجود از منطقه پرواز هم مرجع<sup>۵</sup> می‌شود. موفقیت استفاده از این روش

بستگی به میزان تفاوت‌های بین تصویربرداری توسط پهپاد با شرایط تصویربرداری تصاویر آرشیو خواهد داشت [۳۲]. استفاده از این روش در صورت موفقیت نیازی به اطلاعات دیگری نخواهد داشت.

در روش سوم، استفاده از سیستم های اطلاعات مکانی، ابتدا یک سری اطلاعات نقطه‌ای و خطی مناسب، مانند جاده‌ها، خطوط راه‌آهن یا نقاط ابتدا و انتهای جاده‌ها، تونلها، و یا تقاطع جاده‌ها، از روی تصاویر پهپاد استخراج شده و پس از آماده نمودن آنها جهت ورود در سیستم های اطلاعات مکانی، بین این اطلاعات و لایه‌های برداری اطلاعات مکانی موجود، تناظریابی انجام گرفته و تصاویر پهپاد با این اطلاعات مکانی موجود در سیستم های اطلاعات مکانی هم مرجع می‌شوند و پارامترهای موقعیت و وضعیت دوربین با این روش استخراج می‌گردد.

در روش چهارم، استفاده از ستارگان با استفاده از تصویربرداری از ستارگان در شب هنگام بوسیله موقعیت یاب ستاره ای و نیز ثبت زمان دقیق تصویربرداری و کاتالوگ مختصاتی ستارگان تعیین موقعیت پهپاد با استفاده از اصول ناوبری سماوی انجام می‌شود.

در هر کدام از این روشها وجود اطلاعات مکانی آرشیو شده به صورت یک پایگاه داده اطلاعاتی در روی رایانه مستقر بر روی پهپاد ضروری می‌باشد. همچنین، این روشها تا حدودی مستقل از رهیاب می‌باشند و برای انجام سریع محاسبات تناظریابی و محدود نمودن فضای جستجو در اطلاعات و تصاویر آرشیو، معلوم بودن موقعیت تقریبی پهپاد در هنگام تصویربرداری و یا اندازه‌گیریهای ارتفاعی ضروری می‌باشد که این اطلاعات از آخرین داده‌های رهیاب و یا داده های سیستم ناوبری لختی استخراج می‌گردد [۳۰]. در صورتی که این موقعیت تقریبی معلوم نباشد به دلیل وسیع بودن بازه جستجو در اطلاعات آرشیو و زمان‌بر بودن آن، روشهای فوق اغلب به نتیجه نخواهند رسید.

## ۲-۲- روشهای بصری در تعیین موقعیت نسبی

ناوبری با استفاده از تصاویر در حالت نسبی به دو روش تعیین مسیر بصری (VO) و روش Visual SLAM (VSLAM) قابل اجرا می‌باشد [۱۸]. گزارش جامعی از شیوه های مختلف روش VO و کاربردهای مختلف آن و نیز مجموعه داده های مرجع قابل استفاده برای مقایسه

<sup>۱</sup> Star Tracker

<sup>۲</sup> Profile

<sup>۳</sup> Corrolation

<sup>۴</sup> Aerial Base

<sup>۵</sup> Register

قابل بازیابی می‌باشد. این ایراد با استفاده از دوربینهای سه بعدی و یا با اندازه‌گیریهای مستقیم فاصله (مانند اندازه گیری ابعاد یک جسم ظاهر شده در تصویر) و یا در ترکیب با سایر حسگرها مانند واحد اندازه گیری لختی قابل رفع می‌باشد [۴۳].

در [۴۴] از تلفیق حسگر دوربین با حسگرهای رهیاب و واحد اندازه گیری لختی و Lidar بوسیله فیلتر کالمن برای ایجاد یک سیستم نقشه بردار سیار پهبادی (UAV-MMS)<sup>۶</sup> استفاده شده است. در این مقاله از مسیر بصری استخراج شده از تصاویر به روش VO برای بهبود تعیین موقعیت سیستم تلفیقی رهیاب با واحد اندازه گیری لختی و نیز هدایت سیستم در مواقع بلوکه شدن نشانک رهیاب استفاده شده است. در [۴۵] نیز از روش VO با دوربین سه بعدی برای ناوبری وسایل نقلیه زمینی در مواقع قطع نشانک رهیاب در یک چارچوب تلفیق حسگرها با استفاده از فیلتر کالمن استفاده شده که خطای انحراف حاصله در این پروژه در یک مسیر ۴۱۰۳ متری در حدود ۴۶/۵ متر برآورد شده است. با توجه به حرکت مداوم و سرعت پرواز پهباد، موقعیت آن در هر لحظه تغییر می‌کند و این موضوع باعث تغییر در موقعیت و وضعیت دوربین و تغییر در شرایط تصویربرداری خواهد شد. بنابراین روشهای تصویر-مبنا در تعیین موقعیت مطلق پهباد بایستی قابل پیاده سازی به صورت کاملاً خودکار و بدون دخالت انسانی (در هم‌مرجع نمودن تصاویر پهباد به اطلاعات آرشیو) باشند. همچنین این محاسبات بایستی تا حد ممکن به محاسبات برخط نزدیک بوده و تغییرات ایجاد شده در شرایط تصویربرداری و مقیاس تصاویر در آنها تاثیر نداشته باشد و یا تاثیرات آنها خنثی شوند. این نیازها استفاده از روشهای تعیین موقعیت مطلق با استفاده از تصاویر پهباد در ارزیابی صحت عملکرد رهیاب پهباد را تا حد زیادی محدود خواهند کرد. در مقابل روشهای تعیین موقعیت نسبی بصری بخصوص روش VO با استفاده از تصاویر پهباد با توجه به همزمانی تصاویر اخذ شده و دارا بودن شرایط یکسان در تصویربرداری، قابل پیاده سازی به صورت محاسبات برخط می‌باشند. ایراد وارده بر روشهای تعیین موقعیت نسبی در این است که برای امکان استفاده از موقعیتهای بدست آمده از این روش در ارزیابی صحت

روشهای مختلف VO در [۳۵] آورده شده است. اجرای این روشها در اکثر محیطها و به طور تقریباً مستقل از اطلاعات جانبی امکان‌پذیر می‌باشد. با این حال، افزایش تدریجی خطای تعیین موقعیت و ایجاد انحراف و نیاز به مقاردهی اولیه سیستم مختصات و نیز مقیاس‌گذاری بردار جابجایی نسبی از مشکلات عمده این روش می‌باشد که برای رفع این مشکل استفاده از اطلاعات حسگر رهیاب و واحد اندازه گیری لختی پیشنهاد شده است [۱۸]. روش VSLAM برای کنترل خطای تدریجی از ایجاد یک یا چندین مسیر حلقوی بسته، استفاده می‌کند که در ناوبری پهباد ایجاد مسیر حلقوی بسته در اکثر مواقع امکان‌پذیر نخواهد بود [۱۸]. در هر دو روش VO و VSLAM از سرشکنی دسته پرتو در پنجره‌های<sup>۱</sup> چندتایی از تصاویر اخذ شده برای کنترل خطای انحراف استفاده می‌شود [۱۸]. در روش VSLAM علاوه بر تعیین بردار جابجایی بین تصاویر متوالی، نقشه مسیر طی شده نیز تهیه می‌شود و بنابراین برای اجرا نیاز به سخت‌افزار و امکانات محاسباتی بیشتری دارد و معمولاً به صورت برخط اجرا نمی‌شود [۱۸]. در روش VO، تنها بردار جابجایی نسبی بین تصاویر متوالی محاسبه می‌شود و نقشه مسیر تهیه و ذخیره‌سازی نمی‌گردد و برای اجرا نیاز به امکانات محاسباتی کمتری داشته و به صورت برخط قابل اجرا می‌باشد [۱۸]. با توجه به ماهیت تدریجی و افزایشی بودن خطای تعیین موقعیت در روش VO، این روش با گذشت زمان و دور شدن از مبدا به سرعت کارایی خود را از دست داده و برای ادامه نیاز به مقدار دهی اولیه مجدد موقعیت مطلق دارد [۱۸].

روش VO، با استفاده از تک دوربین [۳۶، ۳۷]، دوربینهای سه بعدی [۳۶، ۳۸] و یا دوربینهای ۳۶۰ درجه<sup>۲</sup> (OD) [۳۹، ۴۰] قابل اجرا می‌باشد. پارامترهای جابجایی نسبی از دنباله تصاویر اخذ شده و با استفاده از روشهای شار اپتیکی<sup>۳</sup> و یا ردیابی عوارض نقطه‌ای که با استفاده از عملگرهای استخراج نقطه مانند SIFT<sup>۴</sup> [۴۱] و SURF<sup>۵</sup> [۴۲] از تصاویر استخراج می‌شوند تعیین می‌گردند [۲۹، ۳۱]. در VO با استفاده از تک دوربین، حرکت نسبی دوربین در حد یک ضریب مقیاس مجهول

<sup>۱</sup> Windowed Bundle Adjustment

<sup>۲</sup> Omni-Directional Camera

<sup>۳</sup> Optical Flow

<sup>۴</sup> Scale Invariant feature Transform

<sup>۵</sup> Speeded-Up Robust Features

<sup>۶</sup> UAV Mobile Mapping System

عملکرد رهیاب نیاز به مقدار دهی اولیه پارامترهای سیستم مختصات می باشد. در صورت مقداردهی اولیه سیستم مختصات در روش تعیین موقعیت نسبی از لحاظ مختصات مبدا، توجیه محورها و مقیاس طولی می توان از این روشها در ارزیابی تعیین موقعیت مطلق پهپاد توسط رهیاب استفاده کرد. ولی با توجه به این که پهپاد به طور مداوم در حال حرکت می باشد مقداردهی اولیه قابل انجام نخواهد بود و حتی در صورت مقداردهی اولیه در ابتدای پرواز در صورتی نیاز به مقداردهی اولیه مجدد (به هر دلیلی) این کار در حین پرواز پهپاد به راحتی ممکن نخواهد بود. از طرفی در روش تعیین موقعیت نسبی، خطای تجمعی تعیین موقعیت و انحراف مختصاتی ایجاد شده در مسیرهای طولانی، دقت این روش را به سرعت پایین می آورد. بنابراین با توجه به این مطالب و مشکلات موجود در استفاده از هر دو شیوه تعیین موقعیت مطلق و نسبی با استفاده از تصاویر پهپاد، در این مقاله روش اصلاح شده ای مبتنی بر روش VO برای ارزیابی عملکرد رهیاب پهپاد در ادامه ارائه می شود که قابل پیاده سازی به صورت محاسبات برخط بوده و در عین استفاده از تعیین موقعیت نسبی بر مشکلات آن نیز فائق آمده است. در این روش نیازی به موقعیت مطلق برای ارزیابی صحت عملکرد رهیاب نبوده و در نتیجه نیازی هم به مقدار دهی اولیه سیستم مختصات در روش تعیین موقعیت نسبی نیز نخواهد بود.

### ۳- روش تصویر-مبنا در تشخیص وقوع تداخل پارازیت

هدف این مقاله ارائه و توسعه یک روش تصویر-مبنا و مستقل از پردازش نشانکهای رهیاب برای تشخیص وقوع تداخل پارازیت در تعیین موقعیت پهپاد و ارزیابی صحت عملکرد رهیاب می باشد. با استفاده از گیرنده رهیاب مستقر بر روی پهپاد می توان موقعیت پهپاد را با نرخ حداقل یک مشاهده در ثانیه اندازه گیری کرد. در صورتی که رهیاب پهپاد عملکرد صحیحی داشته باشد مسیر بدست آمده از داده های رهیاب با مسیر واقعی پرواز پهپاد انطباق خواهد داشت. همچنین مسیر نسبی طی شده توسط پهپاد را می توان با استفاده از تصاویر اخذ شده توسط دوربین پهپاد و به روش VO و از طریق انجام

توجیه نسبی بین تصاویر متوالی بدست آورد [۴۶]. با توجه به این که دوربین یک حسگر غیرفعال می باشد، عملکرد آن و نیز تصاویر اخذ شده از مسیر پرواز، تحت تاثیر نشانکهای خارجی نخواهند بود. از طرف دیگر، زمین و عوارض ثابت موجود در مسیر پرواز پهپاد نیز قابل دستکاری نمی باشند. بنابراین شکل و ویژگیهای مسیر نسبی بدست آمده از روش VO با شکل و ویژگیهای مسیر واقعی پرواز، بدست آمده از رهیاب با عملکرد صحیح، انطباق بسیار نزدیکی خواهد داشت. در صورتی که عملکرد گیرنده رهیاب به علت تداخل بسامدی ناشی از تداخل پارازیت و یا دستکاری عمدی در مشخصات نشانکهای ارسالی توسط ماهواره های رهیاب و یا به هر دلیل دیگر دچار اختلال شود مسیر رهیاب با مسیر واقعی طی شده انطباق نخواهد داشت. در این صورت با استفاده از مقایسه بین مسیرهای برآورد شده برای پرواز پهپاد به روش VO و از روی داده های تصویری (که مسیر دوربین نامیده می شود) و داده های رهیاب (که مسیر رهیاب نامیده می شود) می توان وجود اختلال در عملکرد رهیاب را آشکار سازی کرد.

این روش پیشنهادی برای ارزیابی صحت عملکرد رهیاب پهپاد بر اساس مبانی زیر طراحی شده است:

- ۱- یکی بودن مسیر واقعی طی شده توسط دوربین و گیرنده رهیاب مستقر بر روی پهپاد
- ۲- غیر فعال بودن حسگر دوربین و عدم تاثیر نشانکهای خارجی بر عملکرد آن
- ۳- غیر قابل دستکاری بودن عوارض موجود در مسیر پروازی پهپاد
- ۴- استحکام هندسی دوربین

#### ۳-۱- داده های مسیری

مسیر مربوط به یک متحرک،  $T$ ، (معادله ۱) به وسیله دنباله ای از زوج مرتبهای  $(t_i, \vec{P}_i)$  و  $i=1:N$  نشان داده می شود که  $\vec{P}_i$  موقعیت متحرک در زمان  $t_i$  و طول مسیر برابر با  $N$  می باشد [۴۷].

$$T = \{(t_1, \vec{P}_1), \dots, (t_i, \vec{P}_i), \dots, (t_N, \vec{P}_N)\}, \quad i=1:N \quad (1)$$

داده های مسیری در کاربردهایی که موقعیت یک متحرک به صورت پیوسته و در طول زمان اندازه گیری

مسیر  $T$ ، (معادله ۱)، می‌توان بردارهای توصیفگر مختلفی را بر اساس مختصاتهای نقاط موجود در آن مسیر استخراج و در محاسبه میزان تشابه دو مسیر متناظر از این توصیفگرها استفاده نمود.

$$\overrightarrow{TD} = f(T) \quad (2)$$

تداخل پارازیت باعث ایجاد خطا در تعیین موقعیت شده و در نتیجه فاصله بین نقاط و زوایای بین امتدادهای نقاط که از این موقعیتهای خطا دار محاسبه شده اند با متناظرشان که از موقعیتهای مطلق یا نسبی بدون خطا بدست آمده اند متفاوت خواهند بود و این تفاوتها که ناشی از خطای موقعیت می‌باشند در توصیفگرهای مربوطه منعکس خواهند شد. در [۵۰] از توصیفگر مسیر "بافت نگاشت جابجائیهای جهتدار"،<sup>۹</sup> HOD برای اندازه گیری شباهت بین مسیرهای طی شده توسط نقاط اتصال استخوانبندی بدن انسان در ابر نقطه بدست آمده از حسگر Kinect، جهت تشخیص افعال<sup>۱۰</sup> افراد استفاده شده است. توصیفگر مسیر HOD میزان حرکت متحرک در راستاهای مختلف را به صورت بافت نگاشتی<sup>۱۱</sup> از مقادیر جابجایی در امتدادهای بین صفر تا ۳۶۰° نشان می‌دهد. مقدار متناظر با هر گام<sup>۱۲</sup> از این بافت نگاشت، میزان حرکت متحرک در آن جهت را نشان می‌دهد. این توصیفگر مسیر مستقل از سرعت متحرک بوده ولی وابسته به توجیه محورهای سیستم مختصات مسیر می‌باشد. بنابراین در حالت کلی امکان مقایسه دو مسیر با سیستم مختصاتهای متفاوت با استفاده از توصیفگر مسیر HOD وجود ندارد. در این مقاله دو بردار توصیفگر مسیر جدید "فاصله بهنجار شده"<sup>۱۳</sup> بین نقاط متوالی<sup>۱۴</sup> و "زاویه بین امتدادهای متوالی"<sup>۱۵</sup> که برای اولین بار ارائه می‌شوند با استفاده از موقعیتهای نقاط مسیر تعریف و از آنها برای مقایسه دو مسیر رهیاب و مسیر دوربین استفاده گردید. تعریف این دو توصیفگر جدید بر اساس این بوده است که توصیفگر مسیر مورد استفاده بایستی مستقل از سیستم مختصات مسیر بوده و توانایی مقایسه مسیرهایی با سیستم مختصاتهای متفاوت را داشته باشد. این موضوع با

می‌شود ایجاد می‌گردد. بطور مثال مسیر پرواز پهباد، مسیر حرکت روبات، مسیر حرکت ورزشکاران در بازی فوتبال، مسیر مهاجرت حیوانات، مسیر عوارض نقطه ای ردیابی شده در فریمهای متوالی یک فایل ویدئو [۴۸]، مسیر حرکت عابران پیاده، مسیر حرکت قلم در نوشتارهای مختلف دستی و بسیاری از پدیده‌های دیگر که با این نوع داده ها قابل بیان هستند. با افزایش استفاده از حسگرهایی مانند رهیاب و واحد اندازه گیری لختی در تجهیزات مختلف همراه<sup>۱</sup> مانند گوشیهای تلفن همراه، ساعت‌های هوشمند و ردیابهای مختلف، علاقه زیادی به استفاده و پردازش داده‌های مسیری مکانی<sup>۲</sup> تولید شده از این تجهیزات به وجود آمده است. مسیرهای تولید شده توسط متحرکهای مختلف، دارای نوفه<sup>۳</sup> یا داده های اشتباه<sup>۴</sup> بوده و نسبت به هم دارای اختلاف مقیاس یا جابجایی و دوران می‌باشند که این موارد به دلایلی مانند اختلال در عملکرد حسگر، وجود نشانکهای مختل کننده، نرخ متفاوت نمونه برداری و یا متفاوت بودن ویژگیهای حرکتی متحرک مانند سرعت‌های متفاوت ایجاد شوند. محاسبات مختلفی مانند جستجو<sup>۵</sup>، فشرده سازی، فهرست سازی<sup>۶</sup>، خوشه بندی، تعیین فاصله و شباهت بر روی این داده ها انجام می‌شود [۴۹]. مقایسه مسیرهای مختلف تولید شده در شاخه‌های مختلف علوم از نظر میزان شباهت یا اختلاف آنها ابزاری مناسب برای استخراج اطلاعات لازم درباره پدیده‌های متحرک و الگوهای حاکم بر حرکت آنها می‌باشد. در این مقاله برای مقایسه دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب از دو توصیفگر مسیر<sup>۷</sup> (TD) که بر اساس موقعیت نقاط مسیر تعریف گردید استفاده شد. مقایسه دو توصیفگر مسیر با استفاده از محاسبه شاخص تشابه کسینوسی<sup>۸</sup> (CSI)، بین دو بردار توصیفگر مسیر انجام گردید.

### ۳-۲- توصیفگر مسیر

توصیفگر مسیر، برداری است که به صورت تابعی از موقعیت نقاط مسیر بیان می‌شود (معادله ۲). برای یک

<sup>۹</sup> Histogram of the Oriented Displacement

<sup>۱۰</sup> Action Recognition

<sup>۱۱</sup> Histogram

<sup>۱۲</sup> Bin

<sup>۱۳</sup> Normalized

<sup>۱</sup> Mobile

<sup>۲</sup> Spatial Trajectory Data

<sup>۳</sup> Noise

<sup>۴</sup> Outlier

<sup>۵</sup> Query

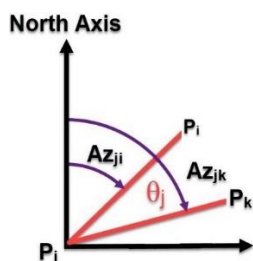
<sup>۶</sup> Indexing

<sup>۷</sup> Trajectory Descriptor

<sup>۸</sup> Cosine Similarity Index

### ۳-۲-۲- توصیفگر زاویه بین امتدادهای متوالی CDA<sup>۲</sup>

زاویه بین دو امتداد متوالی در هر نقطه  $j$ -ام از مسیر،  $\theta_j$ ، (شکل ۳) قابل محاسبه از مختصات نقاط تشکیل دهنده آن زاویه می‌باشد. این کمیت مستقل از سیستم مختصات مسیر، جهت حرکت و مسافت طی شده توسط متحرک و نیز مقیاس طول می‌باشد. مقدار زاویه  $\theta_j$  بین دو امتداد متوالی  $ij$  و  $jk$  در هر نقطه  $j$ -ام از مسیر، از تفاضل زاویه سمت<sup>۳</sup> امتدادهای تشکیل دهنده آن زاویه (معادله ۶) و بر حسب مختصات سه نقطه تشکیل دهنده آن زاویه قابل محاسبه می‌باشد (معادله ۷). بردار متشکل از زوایای نقاط یک مسیر می‌تواند به عنوان توصیفگر آن مسیر مورد استفاده قرار گیرد (معادله ۸).



شکل ۳- رابطه زاویه  $\theta_j$  با زاویه سمت امتدادهای زاویه  $j$

توصیفگر CDA (معادله ۸)، برای یک مسیر  $N$  نقطه‌ای، برداری  $(N - 2)$  بعدی متشکل از مقادیر زاویه  $\theta_j$  در هر نقطه از مسیر می‌باشد.

$$Az_{ij} = \tan^{-1} \left( \frac{x_j - x_i}{y_j - y_i} \right) \quad (6)$$

$$\theta_j = Az_{jk} - Az_{ji} \quad (7)$$

$$CDA = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{N-1}\} \quad (8)$$

در ادامه دو بردار توصیفگر NDCP و CDA تعریف شده در فوق برای مقایسه بین دو مسیر رهیاب و مسیر دوربین استفاده خواهند شد.

### ۳-۳- تعیین مسیر دوربین به روش VO

با استفاده از دنباله تصاویر تک فریم یا تصاویر ویدئویی، تعیین مسیر نسبی حرکت دوربین نسبت به عوارض محیط

توجه به اینکه مسیر پهپاد بدست آمده از تصاویر پهپاد با مسیر پهپاد بدست آمده از طریق داده های رهیاب دارای دو سیستم مختصات متفاوت می باشد ضروری است.

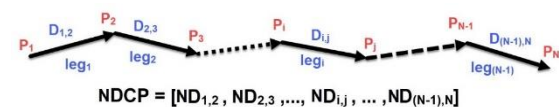
### ۳-۲-۱- توصیفگر فاصله بهنجار شده بین نقاط متوالی، NDCP<sup>۱</sup>

فاصله  $D_{ij}$  بین نقاط متوالی  $i$  و  $j$  از یک مسیر (معادله ۳) از جمله کمیت‌هایی است که اطلاعات مفیدی درباره حرکت یک متحرک ارائه می‌کند و کمیتی است که مقدار آن مستقل از جهت حرکت متحرک می‌باشد. همچنین فاصله بین نقاط متوالی در یک مسیر مستقل از موقعیت مبدأ و توجیه محورهای سیستم مختصات مسیر بوده ولی وابسته به مقیاس طولی در سیستم مختصات می‌باشد. در صورت تقسیم فاصله بین نقاط متوالی به طول کل مسیر، مقدار بهنجار شده این کمیت نیز مستقل از مقیاس طولی خواهد شد. بردار توصیفگر "فاصله بهنجار شده بین نقاط متوالی"، NDCP، برداری است که از فواصل بهنجار شده  $ND_{ij}$  (معادله ۴) بین نقاط متوالی مسیر تشکیل می‌گردد (معادله ۵). تاثیر هر عاملی که باعث ایجاد تغییر در فاصله بین نقاط متوالی در یک مسیر شود، در بردار توصیفگر NDCP دیده خواهد شد. برای هر مسیر  $N$  نقطه ای، بردار توصیفگر NDCP، یک بردار توصیفگر  $(N - 1)$  نقطه ای خواهد بود. شکل (۲) مفهوم بردار توصیفگر مسیر NDCP را نشان می‌دهد.

$$D_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (3)$$

$$ND_{ij} = \frac{D_{ij}}{\sum_{i=1}^{N-1} D_{ij}} \quad (4)$$

$$NDCP = \{ND_{1,2}, ND_{2,3}, \dots, ND_{(N-1),N}\} \quad (5)$$



شکل ۲- بردار توصیفگر مسیر NDCP برای یک مسیر  $N$  نقطه‌ای

<sup>۲</sup> Consecutive Directions Angle

<sup>۳</sup> Azimuth

<sup>۱</sup> Normalized Distance of Consecutive Points



فاصله از مدل سه بعدی  $(k-1)$  به مدل سه بعدی  $(k)$  می‌باشد.

مجموعه موقعیتهای  $\{\bar{P}_1, \dots, \bar{P}_N\}$ ، مسیر نسبی طی شده توسط دوربین در سیستم مختصات سه بعدی دوربین اول را بیان می‌کند.

### ۳-۴- شاخص تشابه کسینوسی CSI و مقایسه توصیفگرهای مسیر

برای شناسایی وقوع تداخل پارازیت، دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب بایستی با هم مقایسه شوند. مقایسه این دو مسیر بر اساس بردارهای توصیفگر مسیر تولید شده برای آنها انجام می‌شود. در صورتیکه  $\overline{TD}_1$  و  $\overline{TD}_2$  بردارهای توصیفگر تولید شده برای دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب باشند میزان زاویه  $\alpha$  بین آنها بر حسب تعریف ضرب داخلی (معادله ۱۰) شاخصی از میزان تشابه بین این بردارهای توصیفگر خواهد بود. هر چقدر مقدار این زاویه کوچکتر باشد دو بردار تشابه بیشتری با هم خواهند داشت. در عمل برای بیان تشابه دو بردار، به جای زاویه  $\alpha$  که دارای رابطه عکس با میزان تشابه دو بردار می‌باشد از مقدار بهنجار شده زاویه  $\alpha$  یا شاخص CSI (معادله ۱۱) که با میزان تشابه دو بردار رابطه مستقیم دارد استفاده می‌شود [۵۴]. شاخص CSI، عددی بین صفر تا یک و یا بین ۰٪ تا ۱۰۰٪ خواهد بود.

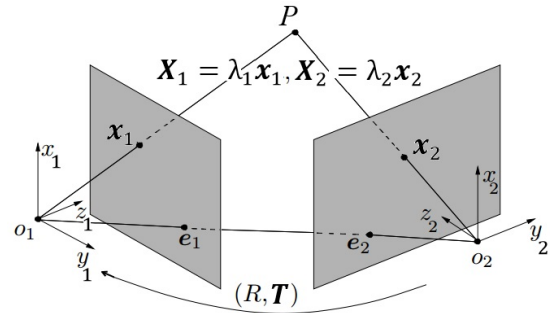
$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{\langle \overline{TD}_1, \overline{TD}_2 \rangle}{\|\overline{TD}_1\| \|\overline{TD}_2\|} \right) \quad (10)$$

$$CSI = \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \times 100 \quad (11)$$

مقدار شاخص CSI تعیین شده بین دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب بر اساس توصیفگرهای آنها می‌تواند شاخصی از وقوع یا عدم وقوع خطای نظاممند<sup>۱</sup> در مسیر رهیاب محسوب گردد. در صورتی که تداخل پارازیت رخ نداده باشد مقدار شاخص CSI بین دو مسیر رهیاب و مسیر دوربین نزدیک به ۱۰۰٪ خواهد بود. البته مقدار شاخص CSI حتی در صورت عدم وقوع تداخل پارازیت هرگز ۱۰۰٪ نخواهد شد که علت

<sup>۱</sup> Systematic Error

امکان پذیر می‌باشد که به این روش در حوزه ماشین بینایی تعیین مسیر بصری، VO، گفته می‌شود [۵۱، ۵۲]. روش VO یک فرآیند تدریجی است که در آن مسیر نسبی حرکت دوربین با استفاده از برآورد پارامترهای جابجایی نسبی متحرک،  $(R, \vec{T})$ ، ماتریس دوران نسبی و  $\vec{T}$  بردار جابجایی نسبی بین دو فریم) از یک فریم به فریم دیگر تقریب زده می‌شود (شکل ۴) [۳۶، ۵۳].



شکل ۴- محاسبه پارامترهای توجیه نسبی  $(R, \vec{T})$  بین دو تصویر پوششی متوالی از روی نقاط متناظر

در VO، موقعیتهای مراکز دوربین در تصاویر متوالی همگی باید در یک سیستم مختصات بیان شوند. این کار مستلزم مقداردهی اولیه سیستم می‌باشد. در عمل، سیستم مختصات دوربین در اولین تصویر به عنوان سیستم مختصات نهایی فرض می‌شود و پس از مقداردهی اولیه مقیاس طولی در اولین مدل سه بعدی از تصاویر متوالی اخذ شده، پارامترهای توجیه نسبی  $(R_{ji}, \vec{T}_{ji})$ ، محاسبه شده بین سایر زوج تصاویر متوالی با استفاده از معادلات (۹) به سیستم مختصات دوربین در اولین تصویر انتقال می‌یابند.

$$\begin{aligned} \bar{P}_1 &= \vec{0} \\ \bar{P}_r &= \vec{T}_r \\ \bar{P}_r &= \bar{P}_r + s_{r1} R_{r1} \vec{T}_{r1} \\ \bar{P}_r &= \bar{P}_r + s_{r2} R_{r2} \vec{T}_{r2} \\ &\vdots \\ \bar{P}_k &= \bar{P}_{k-1} + s_{(k-1)(k-2)} R_{(k)(k-1)} \vec{T}_{(k)(k-1)} \end{aligned} \quad (9)$$

در این معادلات،  $\bar{P}_k$  بردار مکان مرکز دوربین  $k$  - ام در سیستم مختصات سه بعدی دوربین اول و  $\vec{T}_{(k)(k-1)}$  بردار مکان مرکز همین دوربین در سیستم مختصات دوربین  $(k-1)$  - ام و  $s_{(k-1)(k-2)}$  ضریب مقیاس تبدیل

پرداخته می‌شود و سپس نحوه شبیه سازی تداخل پارازیت بیان خواهد شد. در ادامه نیز عملکرد توصیفگرهای مسیر ارائه شده در این مقاله بر مبنای شاخص DCSI آورده شده است. با توجه به محدودیتهای قانونی موجود در استفاده از جمر واقعی و نیز حفظ امنیت پرواز پهپاد، تاثیرات تداخل پارازیت با توجه به کار انجام شده در [۶، ۱۱]، با استفاده از شبیه سازی تاثیر خطای تعیین موقعیت گیرنده رهیاب ناشی از تداخل پارازیت در موقعیت نقاط مسیر پهپاد اعمال گردید.

#### ۴-۱- داده های مورد استفاده

برای ارزیابی روش ارائه شده در این مقاله از ۴۲ تصویر هوایی از منطقه بشاگرد ایران، اخذ شده توسط پهپاد فانتوم ۳ که با استفاده از داده‌های رهیاب برچسب گذاری<sup>۲</sup> شده‌اند استفاده گردید. دوربین مورد استفاده، مارک DJI و از نوع FC300S با فاصله کانونی ۴mm و با ابعاد تصویر ۳۰۰۰ در ۴۰۰۰ پیکسل و با زاویه میدان دید ۹۴° می باشد. پوشش طولی این تصاویر در حدود ۷۵٪ الی ۸۰٪ می‌باشد که از ارتفاع در حدود ۷۰ متری از سطح زمین اخذ شده‌اند. طول کل نیز مسیر پرواز در حدود ۸۶۰ متر می‌باشد.



الف



ب

شکل ۵- الف و ب: یک زوج تصویر نمونه و دارای پوشش مشترک از مسیر پرواز پهپاد

آن وجود خطای تعیین موقعیت خدمات<sup>۱</sup> استاندارد رهیاب در کلیه مواقع و نیز وجود انحراف و خطای تجمعی تعیین موقعیت نسبی با استفاده از روش VO می‌باشد. در صورت وقوع تداخل پارازیت مقدار شاخص CSI افت زیادتری نسبت به مقدار ایده‌آل آن یعنی ۱۰۰٪ خواهد داشت. مقدار کاهش شاخص CSI از ۱۰۰٪ ناشی از وقوع تداخل پارازیت، با شاخص DCSI (معادله ۱۲) نشان داده خواهد شد. این شاخص رابطه مستقیمی با وقوع خطای نظاممند در تعیین موقعیت پهپاد توسط رهیاب در اثر وقوع تداخل پارازیت دارد.

$$DCSI = 100 - CSI \quad (12)$$

در صورت وقوع تداخل پارازیت مقدار شاخص DCSI افزایش خواهد یافت و در صورتی که حملات تداخل پارازیت رخ نداده باشد و تعیین موقعیت رهیاب درست انجام شود مقدار شاخص DCSI نزدیک به صفر درصد خواهد بود.

#### ۳-۵- پنجره لغزنده

یکی از مشکلات روش VO، خطای تجمعی در تعیین موقعیت می‌باشد که باعث ایجاد انحراف نسبت به مسیر اصلی می‌گردد. یکی از عوامل مهم در مقدار خطای انحراف طول مسیر (یا به عبارت دیگر تعداد تصاویر) می‌باشد. در این مقاله برای مقابله با این خطا علاوه بر استفاده از روش سرشکنی دسته اشعه، کل طول مسیر و تعداد تصاویر مورد استفاده برای محاسبه شاخص DCSI در هر موقعیت از مسیر، به تعداد کمی محدود گردید که تاثیر آن در محاسبه شاخص DCSI در قسمت نتایج آورده شده است. پنجره لغزنده یک دریچه برای انتخاب تعدادی مشخص از تصاویر پهپاد در هر موقعیت خاص از مسیر می‌باشد. این پنجره از ابتدا تا انتهای مسیر حرکت کرده و برای هر موقعیت از مسیر شاخص DCSI بر اساس مسیر دوربین استخراج شده از تصاویر داخل این پنجره محاسبه خواهد شد.

#### ۴- پیاده سازی، نتایج و ارزیابی‌ها

در این قسمت نتایج بدست آمده از پیاده سازی روش ارائه شده در این مقاله آورده شده است. ابتدا به معرفی مشخصات داده های تصویر استفاده شده در این قسمت

### ۳-۴- ارزیابی عملکرد شاخص DCSI در صورت وقوع تداخل پارازیت

همانطور که در بخش ۳-۴ بیان شد انتظار می‌رود که در صورت وقوع تداخل پارازیت مقدار شاخص DCSI افزایش یابد. در این قسمت بر آن هستیم که عملکرد شاخص DCSI در هنگام وقوع تداخل پارازیت را بررسی کنیم. برای این منظور ابتدای خطای موقعیت ناشی از تداخل پارازیت در موقعیت نقاط مسیر رهیاب به صورت یک خطای تصادفی با توزیع بهنجار  $N(\Delta m, \Delta m)$  به موقعیت نقاط واقع در نیمه دوم از مسیر رهیاب اعمال گردید. سپس شاخص DCSI در هر موقعیت از مسیر پهناد برای موقعیتهای واقع در داخل یک پنجره لغزنده ۱۰ تایی از تصاویر پهناد و موقعیتهای رهیاب محاسبه گردید. برای این منظور ابتدا مسیر رهیاب و مسیر دوربین برای نقاط واقع در داخل این پنجره استخراج شده و توصیفگرهای مسیر CDA و NDCP برای هر کدام از این دو مسیر محاسبه و مقدار شاخص DCSI برای مسیرهای محاسبه شده در داخل این پنجره محاسبه گردید. با حرکت این پنجره لغزنده از ابتدای مسیر پهناد تا انتهای آن مقادیر DCSI در هر نقطه از مسیر پهناد برای هر دو توصیفگر مسیر تعریف شده محاسبه گردید.

شکل (۶) نمودار مقادیر DCSI محاسبه شده برای هر دو توصیفگر مسیر و عملکرد این شاخص نسبت به وقوع تداخل پارازیت در نیمه دوم از مسیر پهناد را نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار ارائه شده در شکل (۶) دیده می‌شود در نیمه اول از مسیر پهناد که تداخل پارازیت وجود ندارد و رهیاب عملکرد صحیحی دارد مقدار شاخص DCSI نزدیک به صفر می‌باشد و اندک اختلاف آن از مقدار صفر در ابتدای مسیر ناشی از وجود خطای تعیین موقعیت خدمات استاندارد رهیاب در حد  $1,5m$  و نیز خطای تجمعی در مسیر دوربین می‌باشد. همانطور که از شکل نیز دیده می‌شود توصیفگر مسیر CDA در مقایسه با توصیفگر مسیر NDCP حساسیت کمتری نسبت به این خطاها به خصوص در ابتدای مسیر پهناد دارا می‌باشد. با رسیدن پهناد به نیمه دوم مسیر که محل وقوع تداخل پارازیت می‌باشد مقدار شاخص DCSI به طور محسوسی و با شیب تند و برای هر دو توصیفگر مسیر CDA و NDCP با ترتیب به مقادیر نزدیک شش و نه افزایش می‌یابد که

شکل (۵) یک زوج تصویر پوششی نمونه از این مجموعه را نشان می‌دهد. دقت تعیین موقعیت مراکز این تصاویر با استفاده از داده های رهیاب پهناد در حدود  $1/5m$  می‌باشد.

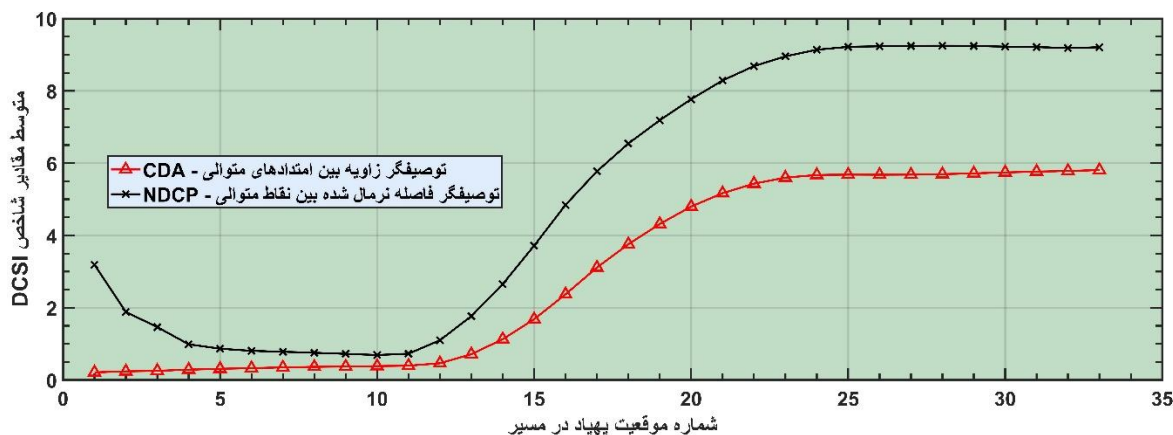
### ۴-۲- شبیه سازی تداخل پارازیت

با توجه به اینکه امکان استفاده از جمر واقعی در این تحقیق وجود نداشت وقوع تداخل پارازیت با استفاده از نحوه تاثیر تداخل پارازیت بر روی تعیین موقعیت رهیاب پهناد به صورت شبیه سازی انجام شد. تداخل پارازیت می‌تواند با توانهای مختلف و در بازه های زمانی متفاوت انجام شود. در [۱۱] نشان داده شده است که در اثر تداخل پارازیت، اندازه خطای تعیین موقعیت با استفاده از رهیاب بیشتر از مواقع عادی خواهد بود. در این تحقیق نشان داده شده است که خطای تعیین موقعیت با رهیاب در مواقع وقوع تداخل پارازیت برای انواع گیرنده‌ها، دارای توزیعی نزدیک به توزیع بهنجار<sup>۱</sup> بوده که میانگین و انحراف معیار آن تقریباً با هم برابر می‌باشند. در این تحقیق همچنین نشان داده شده است که با افزایش توان نشانکهای تداخل پارازیت میانگین و انحراف معیار خطای تعیین موقعیت با رهیاب نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در این مقاله با توجه به کار انجام شده در [۱۱] برای شبیه سازی وقوع تداخل پارازیت و بررسی تاثیر آن، خطای تعیین موقعیتی به صورت یک خطای تصادفی دارای توزیع بهنجار،  $N(\text{Mean}, \text{STD})$ ، به داده های موقعیت پهناد به دست آمده از گیرنده رهیاب افزوده گردید. همچنین برای نمایش تاثیر افزایش توان نشانکهای تداخل پارازیت نیز مقادیر میانگین و انحراف معیار این خطا در چند مرحله افزایش داده شد. برای نمایش تاثیر بازه زمانی وقوع تداخل پارازیت نیز، خطای موقعیت ناشی از تداخل پارازیت به چهار بخش مختلف از مسیر پهناد یعنی: به یک چهارم آخر، نصف آخر، سه چهارم آخر و نیز کل مسیر پهناد اعمال گردید. با توجه ماهیت تصادفی خطای تعیین موقعیت ناشی از تداخل پارازیت، این خطا برای هر حالت مختلف به صورت تکراری (۱۰۰۰ بار تکرار) تولید و اعمال شد و نتایج ارائه شده برای هر حالت، میانگین نتایج بدست آمده برای کل تکرارها در هر حالت خاص می‌باشد.

<sup>۱</sup> Normal Distribution

اختلاف فاحش و معنی‌داری با مقدار صفر دارند و این مقادیر از شاخص DCSI نشان‌دهنده وقوع تداخل پارازیت و خطای نظاممند در تعیین موقعیت رهیاب می‌باشد. در

اینجا نشان داده شد که وقوع تداخل پارازیت نیمه دوم از مسیر با استفاده از توصیفگرهای مسیر CDA و NDCP و با استفاده از شاخص DCSI قابل آشکارسازی می‌باشد.



شکل ۶- نمودار مقادیر متوسط شاخص DCSI برای توصیفگرهای CDA و NDCP در زمان وقوع تداخل پارازیت در نیمه دوم از مسیر پهپاد

#### ۴-۴- بررسی تاثیر ابعاد پنجره لغزنده

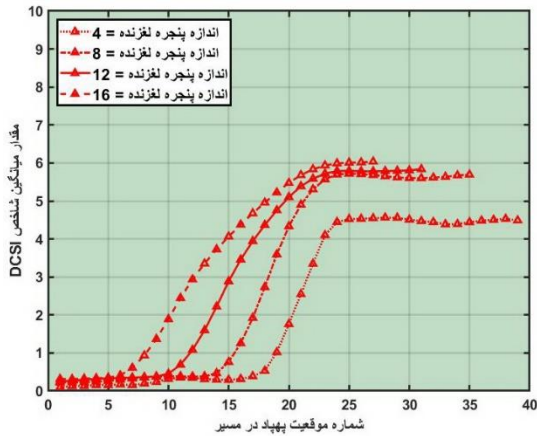
همانطور که گفته شد در هر موقعیت از مسیر پهپاد برای استخراج توصیفگرهای مسیر CDA و NDCP متناظر با هر دو مسیر دوربین و مسیر رهیاب، از موقعیت تعداد محدودی از نقاط مسیر در داخل یک پنجره لغزنده استفاده می‌شود. در صورت استفاده از پنجره لغزنده ای به ابعاد کل نقاط مسیر پهپاد برای محاسبه شاخص DCSI، در این صورت برای کل مسیر تنها یک مقدار شاخص DCSI تولید می‌شود که زیاد قابل اطمینان نبوده و مناسب برای تصمیم‌گیری نمی‌باشد. استفاده از پنجره لغزنده با ابعادی کوچکتر از طول کل مسیر پهپاد این امکان را فراهم می‌کند که بتوان برای هر نقطه از مسیر پهپاد یک مقدار شاخص DCSI استخراج کرده و تصمیم‌گیری درباره صحت عملکرد رهیاب پهپاد و نیز وقوع تداخل پارازیت مبتنی بر مبنای تعداد زیادی از مقادیر شاخص DCSI خواهد بود. از سوی دیگر استفاده از یک پنجره با تعداد محدودی از نقاط مسیر پهپاد باعث کاهش بسیار زیاد تاثیر خطای تجمعی و انحراف ناشی از آن در روش VO در تعیین مسیر دوربین خواهد شد و این موضوع باعث افزایش قابلیت اعتماد به شاخص DCSI می‌گردد. در این قسمت نتایج حاصل از تغییر اندازه ابعاد این پنجره در دقت تشخیص وقوع تداخل پارازیت در مسیر پهپاد و تاثیر آن در مقدار شاخص DCSI ارائه می‌گردد. در بررسی تاثیر ابعاد پنجره لغزنده در مقدار

میانگین شاخص DCSI، اندازه پنجره لغزنده در چهار مرحله برابر با مقادیر ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ در نظر گرفته شد. شکل (۷) تاثیر ابعاد این پنجره را در رابطه با هر دو توصیفگر CDA و NDCP نشان می‌دهد. در این بررسی، شبیه‌سازی تداخل پارازیت با اعمال خطای موقعیت با توزیع بهنجار  $N(\Delta m, \delta m)$  که تنها به نقاط نیمه دوم از مسیر رهیاب اعمال گردید انجام شد. همانطور که از هر دو شکل (۷) الف و (۷) ب دیده می‌شود با افزایش تدریجی اندازه این پنجره از مقدار ۴ تا ۱۶، مقدار میانگین شاخص DCSI برای هر دو توصیفگر مسیر CDA و NDCP افزایش می‌یابد. البته این افزایش از اندازه ۴ به ۸ محسوس‌تر می‌باشد ولی در افزایش از مقدار ۸ تا ۱۶ اندازه این پنجره، این تفاوت زیاد محسوس نیست. در مقابل با کاهش ابعاد پنجره لغزنده افزایش مقدار میانگین شاخص DCSI از نیمه دوم مسیر به بعد (که خطای ناشی از تداخل پارازیت در آن اعمال شده) به صورت دفعی و با شیب تندتری صورت گرفته است. افزایش دفعی مقدار شاخص DCSI در ابعاد کوچکتر پنجره لغزنده نشانگر حساسیت بیشتر به خطای تعیین موقعیت ناشی از تداخل پارازیت در اندازه‌های کوچکتر پنجره لغزنده می‌باشد. در ادامه و برای بررسی‌های بیشتر، ابعاد پنجره لغزنده را برابر با ۴ در نظر خواهیم گرفت که دارای حساسیت سریعتری نسبت به وقوع تداخل پارازیت می‌باشد.

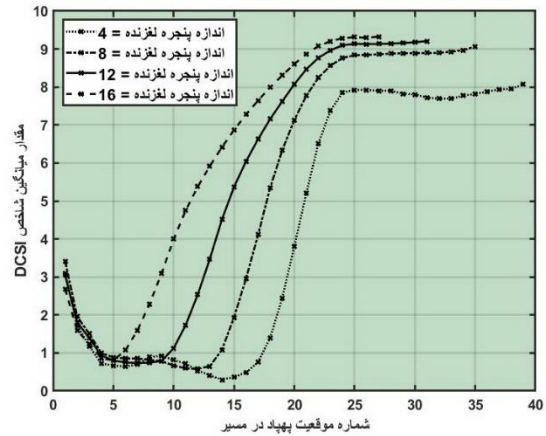
#### ۴-۵- بررسی تاثیر قدرت نشانک تداخل پارازیت

توان نشانکهای تداخل پارازیت می‌تواند متفاوت باشد. با افزایش توان حملات تداخل پارازیت مقادیر میانگین و انحراف معیار تابع توزیع احتمال خطای تعیین موقعیت با رهیاب،  $N(\text{Mean}, \text{STD})$ ، نیز افزایش خواهد یافت [۱۱]. در شبیه سازی تاثیر تداخل پارازیت در این مقاله نیز تاثیر افزایش توان نشانکهای تداخل پارازیت با افزایش مقادیر میانگین و انحراف معیار تابع توزیع احتمال خطای تعیین موقعیت با رهیاب مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر میانگین و انحراف معیار خطا در این شبیه سازی طبق نتایج ارائه شده در [۱۱] با هم برابر فرض شد و مقادیر آنها به ترتیب برابر با ۵m، ۱۰m، ۲۰m و ۳۰m در نظر گرفته شدند. شکل (۸) نمودار مقادیر میانگین شاخص DCSI برای هر

دو توصیفگر CDA و NDCP را نشان می‌دهد. در این بررسی خطای تعیین موقعیت تنها بر روی موقعیت نقاط واقع در نیمه دوم از مسیر رهیاب اعمال گردید. ابعاد پنجره لغزنده در این بررسی برابر با ۴ در نظر گرفته شد. همانطور که از این دو نمودار دیده می‌شود با افزایش میانگین و انحراف معیار خطای تعیین موقعیت ناشی از تداخل پارازیت مقدار شاخص DCSI برای هر دو توصیفگر مسیر نیز افزایش می‌یابد. این افزایش تاثیر بیشتری بر روی مقادیر شاخص DCSI بدست آمده از توصیفگر مسیر CDA داشته است (شکل ۸-ب). همچنین مقادیر شاخص DCSI با افزایش مقدار میانگین و انحراف معیار خطای تعیین موقعیت با رهیاب در هر دو توصیفگر به یک مقدار خاص نزدیک به ۱۲٪ همگرا شده‌اند.

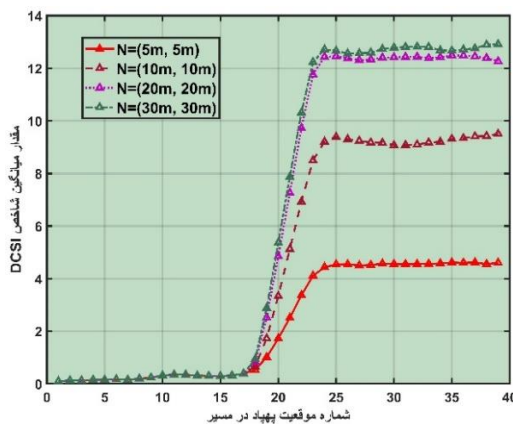


ب

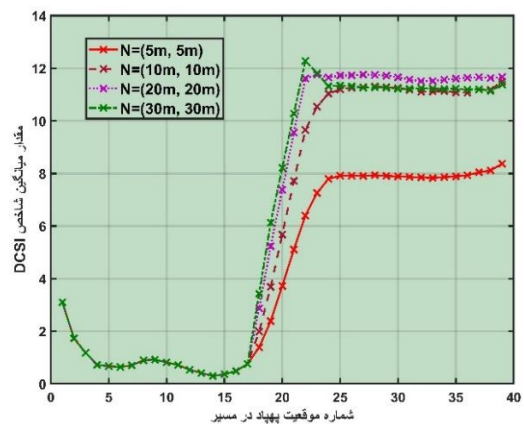


الف

شکل ۷- نمودار تاثیر کاهش اندازه پنجره لغزنده در رفتار شاخص DCSI  
الف: نمودار رفتار توصیفگر مسیر NDCP ب: نمودار رفتار توصیفگر مسیر CDA

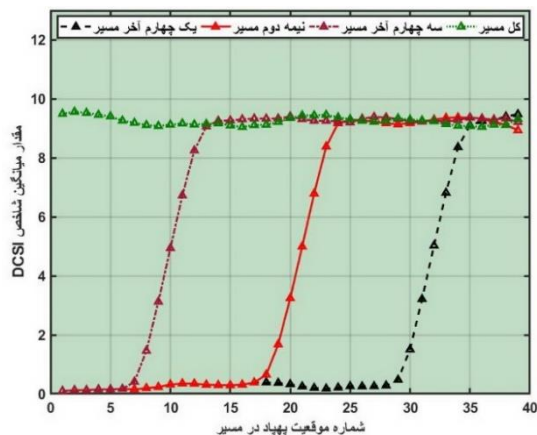


ب

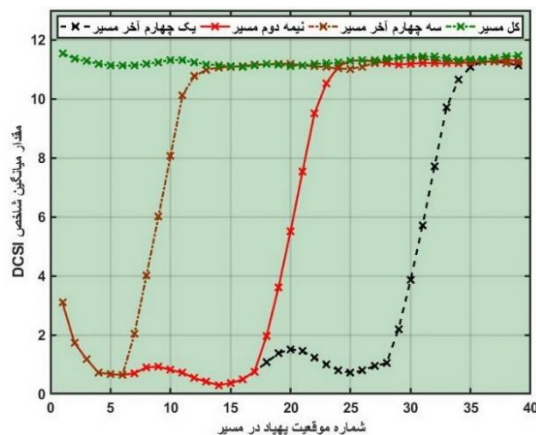


الف

شکل ۸- نمودار تاثیر افزایش میانگین و انحراف معیار خطای تعیین موقعیت با رهیاب ناشی از تداخل پارازیت در رفتار شاخص DCSI.  
الف: نمودار رفتار توصیفگر مسیر NDCP ب: نمودار رفتار توصیفگر مسیر CDA



ب



الف

شکل ۹- نمودار تاثیر افزایش بازه زمانی تداخل پارازیت در رفتار شاخص DCSI

الف: نمودار رفتار توصیفگر مسیر NDCP ب: نمودار رفتار توصیفگر مسیر CDA

جدول ۱- مشخصات رایانه مورد استفاده در محاسبات

نوع رایانه (لب تاب)	نوع CPU	نوع GPU	RAM
MSI PE60-6QE	Core-i7	GTX-960M(4GB)	۱۶GB

روش ارائه شده در اینجا برای آشکارسازی وقوع حملات اختلال پارازیت بر اساس استفاده از روش VO بوده و مراحل آن بر اساس جدول ۲ می باشد. در این محاسبات، ابعاد پنجره لغزنده برای انتخاب تصاویر جهت تعیین مسیر بصری پهباد برابر با ۴ در نظر گرفته شده است. مقادیر زمان ارائه شده در جدول ۲ برای مراحل مختلف بر اساس زمان بدست آمده از نرم افزارهای VisualSFM و Matlab می باشند.

جدول ۲- مراحل مختلف محاسبات و زمان لازم برای اجرا

شماره	مرحله	زمان لازم (ثانیه)
۱	اخذ و ذخیره تصویر	۱/۰۰
۲	ایجاد پیرامید	۰/۰۴
۳	استخراج نقاط	۰/۶۷
۴	تناظریابی نقاط	۰/۹۱
۶	سرشکنی دسته پرتو (۴ تصویر)	۰/۴
۷	استخراج توصیفگر مسیر	۰/۰۰۱
۸	استخراج شاخص DCSI	۰/۰۰۱
۹	کل زمان لازم	۲/۰۶۲

همانطور که از جدول ۲ دیده می شود بیشترین زمان لازم مربوط به مراحل استخراج و تناظریابی نقاط می باشد. با توجه به نرخ مشاهدات رهیاب برابر با یک هرتز می توان نتیجه گرفت در صورت امکان حمل رایانه توسط پهباد امکان پیاده سازی الگوریتم به صورت برخط وجود خواهد داشت.

#### ۴-۶- بررسی تاثیر بازه زمانی تداخل پارازیت

در این قسمت عملکرد توصیفگرهای CDA و NDCP در میزان تغییر مقدار میانگین شاخص DCSI در مقابل افزایش زمان حملات تداخل پارازیت مورد بررسی قرار می گیرد. برای این بررسی، مدت تداخل پارازیت با اعمال خطای تعیین موقعیت با توزیع بهنجار  $N(\Delta m, \Delta m)$  به موقعیتهای نقاط مسیر در بازه های زمانی یک چهارم آخر مسیر، نیمه آخر مسیر، سه چهارم آخر مسیر و کل مسیر، شبیه سازی گردید. شکل (۹) نتیجه عملکرد هر دو توصیفگر CDA و NDCP را برای چهار بازه زمانی فوق نشان می دهد. در این بررسی ابعاد پنجره لغزنده برای انتخاب نقاط مسیر رهیاب و دوربین در هر موقعیت از مسیر پهباد برابر با چهار در نظر گرفته شد. همانطور که از این شکلها دیده می شود عملکرد این شاخص در هر دو توصیفگر مسیر CDA و NDCP، مستقل از بازه زمانی تداخل پارازیت بوده و حتی در بازه زمانی کوتاه یک چهارم نقاط از کل مسیر پهباد نیز وقوع تداخل پارازیت به خوبی با افزایش قابل ملاحظه ای که در مقدار شاخص DCSI نسبت به مقدار صفر رخ داده قابل تشخیص می باشد.

#### ۴-۷- بررسی عملکرد زمانی الگوریتم ارائه شده

الگوریتم ارائه شده برای عملیاتی بودن بایستی به صورت برخط پیاده سازی شود. آنالیز زمان محاسباتی مراحل مختلف الگوریتم ارائه شده در جدول ۲ آورده شده است. در این ارزیابی زمانی برای انجام محاسبات از رایانه با مشخصات جدول ۱ استفاده شده است.

## ۵- نتیجه گیری

مختلف مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر ابعاد پنجره لغزنده در رفتار شاخص DCSI نشان داده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که می توان بطور موفق از این روش مستقل از پردازش نشانکهای رهیاب و مقاوم در برابر تداخل پارازیت برای آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت استفاده کرد و شاخص DCSI تعریف شده حساسیت مناسبی در مقابل خطای تعیین موقعیت با رهیاب از خود نشان می دهد.

در این مقاله یک روش نو و تصویر-مبنا مبتنی بر استفاده از روش VO و استفاده از توصیفگرهای مسیر برای آشکارسازی وقوع تداخل پارازیت و خطای نظاممند در تعیین موقعیت رهیاب مستقر بر پهباد ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین دو توصیفگر مسیر CAD و NDPC برای مقایسه مسیرها تعریف و استفاده گردید. وقوع تداخل پارازیت در توانهای مختلف و بازه های زمانی

## مراجع

- [1] G. H. Elkaim, F. A. P. Lie, and D. Gebre-Egziabher, "Principles of Guidance, Navigation, and Control of UAVs," in Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, K. P. Valavanis and G. J. Vachtsevanos, Eds. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015, pp. 347-380.
- [2] Z. Tao and W. Lei, "SINS and GPS integrated navigation system of a small unmanned aerial vehicle," in Future BioMedical Information Engineering, 2008. FBIE'08. International Seminar on, 2008, pp. 465-468: IEEE.
- [3] M. Warren, M. Paton, K. MacTavish, A. Schoellig, and T. Barfoot, "Towards Visual Teach and Repeat for GPS-Denied Flight of a Fixed-Wing UAV," in Field and Service Robotics, 2018, pp. 481-498: Springer.
- [4] F. Dovis, GNSS Interference Threats and Countermeasures. Artech House, 2015.
- [5] M. Wildemeersch and J. Fortuny-Guasch, "Radio frequency interference impact assessment on global navigation satellite systems," EC Joint Research Centre, Security Tech. Assessment Unit, Tech. Rep, 2010.
- [6] D. Borio, F. Dovis, H. Kuusniemi, and L. L. Presti, "Impact and detection of GNSS jammers on consumer grade satellite navigation receivers," Proceedings of the IEEE, vol. 104, no. 6, pp. 1233-1245, 2016.
- [7] F. Dovis, GNSS Interference Threats and Countermeasures. Artech House, 2015.
- [8] R. Sabatini, S. Ramasamy, T. Moore, and C. Hill, "Avionics-based GNSS integrity augmentation performance in a jamming environment," in AIAC16: 16th Australian International Aerospace Congress, 2015, p. 469: Engineers Australia.
- [9] L. Ruotsalainen, M. Kirkko-Jaakkola, Z. Bhuiyan, S. Söderholm, S. Thombre, and H. Kuusniemi, "Deeply coupled GNSS, INS and visual sensor integration for interference mitigation," Proc. ION GNSS+, Tampa, FL, USA, 2014.
- [10] S. Haykin, Kalman filtering and neural networks. John Wiley & Sons, 2004.
- [11] H. Kuusniemi, E. Airos, M. Z. H. Bhuiyan, and T. Kröger, "GNSS jammers: how vulnerable are consumer grade satellite navigation receivers?," European Journal of Navigation, vol. 10, no. 2, pp. 14-21, 2012.
- [12] K. Jansen and C. Pöpper, "Advancing attacker models of satellite-based localization systems: the case of multi-device attackers," in Proceedings of the 10th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks, 2017, pp. 156-159: ACM.
- [13] D. Borio and C. Gioia, "Real-time jamming detection using the sum-of-squares paradigm," in Localization and GNSS (ICL-GNSS), 2015 International Conference on, 2015, pp. 1-6: IEEE.
- [14] P. Papadimitratos and A. Jovanovic, "GNSS-based positioning: Attacks and countermeasures," in Military Communications Conference, 2008. MILCOM 2008. IEEE, 2008, pp. 1-7: IEEE.
- [15] N. O. Tippenhauer, C. Pöpper, K. B. Rasmussen, and S. Capkun, "On the requirements for successful GPS spoofing attacks," in Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and communications security, 2011, pp. 75-86: ACM.
- [16] Z. Zhang, S. Gong, A. D. Dimitrovski, and H. Li, "Time synchronization attack in smart grid: Impact and analysis," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 1, pp. 87-98, 2013.
- [17] D. A. M. d. Silva, "GPS jamming and spoofing using software defined radio," 2017.

- [18] F. Fraundorfer and D. Scaramuzza, "Visual odometry: Part i: The first 30 years and fundamentals," IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 18, no. 4, pp. 80-92, 2011.
- [19] D.-G. Sim, R.-H. Park, R.-C. Kim, S. U. Lee, and I.-C. Kim, "Integrated position estimation using aerial image sequences," IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 24, no. 1, pp. 1-18, 2002.
- [20] D.-G. Sim, R.-H. Park, R.-C. Kim, S. U. Lee, and I.-C. Kim, "Integrated position estimation using aerial image sequences," Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, vol. 24, no. 1, pp. 1-18, 2002.
- [21] D.-G. Sim and R.-H. Park, "Localization Based on the Gradient Information for DEM matching," in MVA, 1998, pp. 266-269 :Citeseer.
- [22] V. Tchernykh, M. Beck, and K. Janschek, "Optical flow navigation for an outdoor UAV using a wide angle mono camera and DEM matching," in Mechatronic Systems, 2006, vol. 4, no. 1, pp. 590-595.
- [23] Y. Kim, D. Lee, and H. Bang, "Vision-only uav navigation aided by terrain elevation map," in Control, Automation and Systems (ICCAS), 2012 12th International Conference on, 2012, pp. 1729-1733: IEEE.
- [24] D. Lee, Y. Kim, and H. Bang, "Vision-based terrain referenced navigation for unmanned aerial vehicles using homography relationship," Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 69, no. 1-4, pp. 489-497, 2013.
- [25] F. Samadzadegan, M. Hahn, and S. Saeedi, "Position estimation of aerial vehicle based on a vision aided navigation system," 2007.
- [26] G. Conte and P. Doherty, "An integrated UAV navigation system based on aerial image matching," in Aerospace Conference, 2008 IEEE, 2008, pp. 1-10: IEEE.
- [27] A. Cesetti, E. Frontoni, A. Mancini, A. Ascani, P. Zingaretti, and S. Longhi, "A visual global positioning system for unmanned aerial vehicles used in photogrammetric applications," Journal of Intelligent & Robotic Systems, vol. 61, no. 1-4, pp. 157-168, 2011.
- [28] F. Lindsten, J. Callmer, H. Ohlsson, D. Tornqvist, T. Schon, and F. Gustafsson, "Geo-referencing for UAV navigation using environmental classification," in Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on, 2010, pp. 1420-1425: IEEE.
- [29] F. Samadzadegan and G. Abdi, "Vision-based pose estimation for autonomous outdoor navigation of aerial vehicles," in Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), 2011 2nd International Conference on, 2011, pp. 883-888: IEEE.
- [30] G. Abdi, F. Samadzadegan, and F. Kurz, "POSE ESTIMATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON A VISION-AIDED MULTI-SENSOR FUSION," International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, vol. 41, 2016.
- [31] F. Samadzadegan and G. Abdi, "Autonomous navigation of Unmanned Aerial Vehicles based on multi-sensor data fusion," in 20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2012, pp. 868-873.
- [32] X. Zhuo, T. Koch, F. Kurz, F. Fraundorfer, and P. Reinartz, "Automatic UAV Image Geo-Registration by Matching UAV Images to Georeferenced Image Data," Remote Sensing, vol. 9, no. 4, p. 376, 2017.
- [33] T. Patterson, S. McClean, P. Morrow, and G. Parr, "Utilizing geographic information system data for unmanned aerial vehicle position estimation," in Computer and Robot Vision (CRV), 2011 Canadian Conference on, 2011, pp. 8-15: IEEE.
- [34] D.-Y. Gu, C.-F. Zhu, J. Guo, S.-X. Li, and H.-X. Chang, "Vision-aided UAV navigation using GIS data," in Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2010 IEEE International Conference on, 2010, pp. 78-82: IEEE.
- [35] S. Poddar, R. Kottath, and V. Karar, "Evolution of Visual Odometry Techniques," arXiv preprint arXiv:1804.11142, 2018.
- [36] D. Nistér, O. Naroditsky, and J. Bergen, "Visual odometry," in Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on, 2004, vol. 1, pp. I-652-I-659 Vol. 1: IEEE.
- [37] S. Chhaniyara, K. ALTHOEFER, and L. D. Seneviratne, "Visual odometry technique using circular marker identification for motion parameter estimation," in Int. Conf. Advances in Climbing and Walking Robots, 2008, pp. 1069-1076: World Scientific.
- [38] A. I. Comport, E. Malis, and P. Rives, "Real-time quadrifocal visual odometry," The International Journal of Robotics Research, vol. 29, no. 2-3, pp. 245-266, 2010.
- [39] P. Corke, D. Strelow, and S. Singh, "Omnidirectional visual odometry for a planetary rover," in Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on, 2004, vol. 4, pp. 4007-4012: IEEE.



- [40] D. Scaramuzza and R. Siegwart, "Appearance-guided monocular omnidirectional visual odometry for outdoor ground vehicles," *IEEE transactions on robotics*, vol. 24, no. 5, pp. 1015-1026, 2008.
- [41] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," *International journal of computer vision*, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, 2004.
- [42] H. Bay, T. Tuytelaars, and L. Van Gool, "Surf: Speeded up robust features," in *European conference on computer vision*, 2006, pp. 404-417: Springer.
- [43] D. Scaramuzza and F. Fraundorfer, "Visual odometry [tutorial]," *IEEE robotics & automation magazine*, vol. 18, no. 4, pp. 80-92, 2011.
- [44] M. Elbahnasawy, T. Shamseldin, and A. Habib, "Image-assisted GNSS/INS navigation for UAV-based mobile mapping systems during GNSS outages," in *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, 2018, pp. 417-425.
- [45] F. Liu, Y. B. Sarvrood, and Y. Gao, "Implementation and Analysis of Tightly Integrated INS/Stereo VO for Land Vehicle Navigation," *Journal of Navigation*, vol. 71, no. 1, pp. 83-99, 2018.
- [46] C. Forster, M. Pizzoli, and D. Scaramuzza, "SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry," in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*, 2014, pp. 15-22: IEEE.
- [47] Y. Cai and R. Ng, "Indexing spatio-temporal trajectories with Chebyshev polynomials," in *Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, 2004, pp. 599-610: ACM.
- [48] Y. Caspi, D. Simakov, and M. Irani, "Feature-based sequence-to-sequence matching," *International Journal of Computer Vision*, vol. 68, no. 1, pp. 53-64, 2006.
- [49] Y. Zheng and X. Zhou, *Computing with spatial trajectories*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [50] M. A. Gowayyed, M. Torki, M. E. Hussein, and M. El-Saban, "Histogram of Oriented Displacements (HOD): Describing Trajectories of Human Joints for Action Recognition," in *IJCAI*, 2013.
- [51] M. Irani, B. Rousso, and S. Peleg, "Recovery of ego-motion using image stabilization," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 1994. Proceedings CVPR'94., 1994 IEEE Computer Society Conference on*, 1994, pp. 454-460: IEEE.
- [52] W. Burger and B. Bhanu, "Estimating 3D egomotion from perspective image sequence," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 11, pp. 1040-1058, 1990.
- [53] A. Milella and R. Siegwart, "Stereo-based ego-motion estimation using pixel tracking and iterative closest point," in *Fourth IEEE International Conference on Computer Vision Systems (ICVS'06)*, 2006, pp. 21-21: IEEE.
- [54] G. Sidorov, A. Gelbukh, H. Gómez-Adorno, and D. Pinto, "Soft similarity and soft cosine measure: Similarity of features in vector space model," *Computación y Sistemas*, vol. 18, no. 3, pp. 491-504, 2014.