

تعیین موقعیت سه بعدی اهداف با استفاده از یک سنجنده رادار زمینی موج میلی متری از نوع ورودی - خروجی چندگانه

مجید اسماعیل زاده^۱، جلال امینی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری سنجش از دور - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
m.esmaeilzade@ut.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
jamini@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۹، تاریخ تصویب مهر ۱۴۰۰)

چکیده

امروزه سیستم های راداری در مسائل گوناگونی از جمله سنجش از دور کاربرد دارند. یکی از مهمترین چالش ها، تعیین موقعیت و تعیین میزان جابجایی اهداف با دقت بالا است که بدین منظور از سنجنده های مستقر بر روی سکوی زمینی استفاده می کنند. در این مقاله روشی ارائه شده است که تعیین موقعیت مطلق و نسبی اهداف و نیز تخمین بردار جابجایی اهداف به صورت سه بعدی انجام می گیرد. بدین منظور یک سنجنده راداری زمینی با طول موج میلی متری که دارای دو آنتن فرستنده و چهار آنتن گیرنده است و امواج آن از نوع FMCW هستند، شبیه سازی شده است. این سنجنده طوری طراحی شده است که بر روی یک صفحه دو بعدی حرکت می کند و سیگنال های ارسالی را دریافت می کند. با استفاده از اطلاعات فاز سیگنال های دریافتی توسط آنتن های گیرنده در موقعیت های مختلف مکانی سنجنده، زاویه سیگنال منعکس شده از هدف نسبت به آنتن گیرنده تعیین می شود. سپس با استفاده از معادلات سرشکنی کمترین مربعات، موقعیت مطلق هدف به صورت سه بعدی تعیین می شود. برای ارزیابی مدل ارائه شده دو آزمایش مطرح شد. آزمایش اول نشان داد که مقدار RMSE برای تعیین موقعیت مطلق کمتر از ۳ میلی متر است. در آزمایش دوم، تعیین میزان جابجایی اهداف مورد بررسی قرار گرفت که در نتایج حاصل تمامی موارد، RMSE برای تعیین بردار جابجایی نسبی به صورت سه بعدی کمتر از ۰/۱ میلی متر است. همچنین نشان داده شد که روش ارائه شده هیچ محدودیتی در تعیین جابجایی نسبی با دامنه بزرگی متفاوت را ندارد و بدون استفاده از الگوریتم های بازیابی فاز، توانایی تخمین جابجایی با مقادیر زیاد را دارد.

واژگان کلیدی: سنجنده رادار زمینی موج میلی متری MIMO، جابجایی، تعیین موقعیت مطلق و نسبی، رادار FMCW

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

سازه‌های شهری مانند ساختمان‌ها، جاده‌های مرتفع و پل‌ها از عناصر اصلی یک شهر هستند که زندگی روزمره جمعیت شهری را پشتیبانی می‌کنند. با این وجود، سازه‌های شهری ممکن است به دلیل نقص در طراحی سازه یا ساخت و ساز، فرسودگی، فشار بار ناشی از وسایل نقلیه سنگین عبوری، زمین‌لرزه و غیره، دچار جابجایی شوند. نظارت بر شرایط سازه‌های شهری، شناسایی میزان جابجایی و حل مشکل ایجاد شده از اهمیت خاصی برخوردار است.

پایش جابجایی توسط دو نوع سنجنده انجام می‌گیرد، سنجنده‌های متصل به عارضه و سنجنده‌های غیر متصل به عارضه. سنجنده‌های متصل به عارضه به صورت مستقیم روی شی تحت پایش نصب می‌شوند و به طور مداوم یک نقطه مرجع را به عنوان هدف، تحت نظارت دارند. از طرف دیگر، حسگرهای غیر متصل خارج از محدوده اصلی شی تحت پایش قرار می‌گیرند [۱]. چند نوع متداول از این سنجنده‌ها عبارتند از: توتال استیشن، سنجنده‌های محدوده مرئی مانند پوششگرهای لیزری [۲]، سیستم موقعیت‌یاب جهانی [۳] و سیستم‌های راداری. چنانچه شرایط آب و هوایی مساعد باشد، توتال استیشن‌ها توانایی تعیین جابجایی با دقت میلی‌متری را دارا هستند اما در شرایط آب و هوایی نامساعد (گردوخاک، مه و باران)، دقت این نوع از سنجنده‌ها تحت تأثیر شرایط جوی قرار می‌گیرند. در نتیجه استفاده از توتال استیشن‌ها زمانی که پایش جابجایی اهداف طولانی‌مدت باشد، گزینه مناسبی نیست [۴]. سیستم‌های سنجنده محدوده مرئی نیز شرایط مشابهی را با توتال استیشن‌ها دارند [۵].

استفاده از روش‌های تفاضلی GPS، با وجود مناسب بودن برای پایش طولانی‌مدت، دقتی در حدود سانتی‌متر دارد که برای کاربردهای جابجایی اهداف مناسب نیست [۶]. سیستم‌های مبتنی بر رادار که در شرایط آب‌وهوایی نامساعد نیز عملکرد مطلوبی دارند، در کاربردهای مختلفی به خصوص اندازه‌گیری میزان جابجایی استفاده می‌شوند [۷]. در سال‌های اخیر، استفاده از سنجنده‌های زمینی راداری برای شناسایی اهداف و تعیین میزان جابجایی با دقت بالا افزایش پیدا کرده است. اخیراً برای تمییز اهداف

مختلف از یکدیگر، از سنجنده‌های راداری مدولاسیون فرکانسی موج پیوسته^۱ (FMCW) و خصوصیات فرکانس سیگنال ضربان استفاده می‌شود [۸]. استفاده از خصوصیات فرکانس ضربان دارای دقت کمی است اما با به کارگیری فاز سیگنال ضربان به دقت‌هایی در حدود میکرومتر (با توجه به خصوصیات سنجنده) برای تعیین جابجایی نیز می‌توان رسید [۹].

اولین بار در سال ۲۰۰۷ [۱۰] از رادارهای زمینی به عنوان یک حسگر قابل حمل و با قابلیت نصب سریع و آسان برای پایش جابجایی پل‌ها استفاده شد. در حالت معمول، رادار در زیر عرشه پل قرار می‌گرفت و جابجایی نقاطی از پل را که قابل مشاهده بود، تشخیص می‌داد [۱۱]. در سال‌های اخیر، پایش پل با استفاده از سنجنده‌های زمینی راداری و تکنیک تداخل سنجی، به یک روش کاملاً محبوب برای نظارت بر جابجایی‌ها تبدیل شده است [۱۲]. در تمامی این مقالات، رادار زمینی فقط قادر به تشخیص مؤلفه جابجایی در راستای برد است و تنها جابجایی عرشه پل در راستای دید قابل تعیین بود. از آنجایی که جهت بردار جابجایی عرشه پل‌ها معلوم نیست، اطلاعات جابجایی فقط در راستای برد سنجنده کافی نبود [۱۳]. دی و همکاران [۱۴] به صورت عملی نشان دادند که تشخیص فقط یک مؤلفه جابجایی، زمانی که پل توسط فشار بار زیاد نشست پیدا می‌کند، اطلاعات متناقضی را ارائه می‌کند. بدین ترتیب، تلاش‌های زیادی برای ارائه روشی که بتوان بیش از یک مؤلفه جابجایی را تشخیص داد صورت گرفت.

در سال ۲۰۱۸ توسط [۱۵] روشی ارائه شد که در آن با استفاده هم‌زمان از سه سنجنده راداری زمینی، بردار جابجایی یک بازتابنده گوشه‌ای^۲ که به یک لوله متصل شده بود، شناسایی شد. در سال ۲۰۲۰ دنگ و همکاران [۱۶] آزمایشی را انجام دادند که در آن به طور هم‌زمان از سه رادار زمینی از نوع ورودی - خروجی چندگانه^۳ (MIMO) برای تعیین بردار جابجایی سه‌بعدی یک بازتابنده گوشه‌ای متحرک استفاده شد. در هر دو مقاله ذکر شده و روش ارائه شده توسط آن‌ها، از دو یا چند سیستم راداری زمینی استفاده می‌شود که علاوه بر هزینه گزاف، پیچیدگی استقرار این سنجنده‌ها در محل نیز مشکل‌ساز است.

^۱ Frequency-Modulated Continuous-Wave

^۲ Corner Reflector

^۳ Multiple-Input Multiple-Output

های راداری دیگر دارد. اولین مزیت این است که حسگرهای آن کوچک هستند و به دلیل اشغال فضای کم، روی سطوح کوچک قابل نصب است. مزیت بعدی این است که رادار FMCW با یک مشاهده توانایی تعیین موقعیت مکانی اهداف در راستای برد را دارد. دیگر سنجنده‌های راداری توانایی تعیین فاصله در راستای برد اهداف را با یک سیگنال بازگشتی ندارند. رادار طراحی شده FMCW به گونه‌ای است که دارای چندین گیرنده و فرستنده است تا بتوان از روش‌های آنالیز MIMO استفاده کرد. تکنیک‌های MIMO اطلاعاتی در ارتباط با زاویه برخورد سیگنال به اهداف نسبت به سنجنده ارائه می‌دهند.

۲- هندسه سیستم رادار زمینی MIMO و نحوه جمع‌آوری داده

همانطور که در پیشینه تحقیق مقاله ارائه شده در قسمت مقدمه نیز بیان شده است، چنانچه سنجنده فقط در یک راستا حرکت کند، توانایی تشخیص جابجایی در یک راستا (عموماً در راستای برد) را دارد. در ادامه نیز بیان شده است که چنانچه نیاز به تعیین جابجایی در بیش از یک راستا باشد، از دو یا چند سیستم یا سنجنده راداری استفاده می‌شود. برای حل تعداد مجهولات مولفه‌های مکانی بردار جابجایی (X، Y و Z)، نیاز به حداقل سه سنجنده است و اگر تعیین جابجایی دو بعدی مدنظر باشد، به دو سنجنده نیاز است. تمامی موارد ذکر شده باعث پیچیدگی محاسبات می‌شود علاوه بر اینکه هزینه‌های زیادی را نیز دربردارند. طراحی سنجنده بطوریکه در دو جهت حرکت کند، طبق روابط ذکر شده هندسی و هندسه سیستم حرکتی آن، باعث شده است که سه مولفه مکانی بردار جابجایی با یک سنجنده قابل حل باشد که علاوه بر پیچیدگی محاسباتی کمتر، هزینه به مراتب کمتری نیز دارد. بر اساس پارامترهای طراحی سنجنده، این سیستم در مقایسه با سایر سنجنده‌های راداری زمینی دارای طول موج بسیار کوچکی است و استفاده از قابلیت‌های آن از جمله شناسایی جابجایی‌های کوچک و بزرگ با دقت بالا، چنانچه به صورت سه بعدی مدنظر قرار گیرد، می‌تواند در کاربردهای مختلفی مورد استفاده قرار گیرد. در نتیجه لزوم حرکت سنجنده در دو راستا، به دلیل تعیین بردار جابجایی در سه جهت X، Y و Z است که فقط با یک

در سال ۲۰۱۷ پیرارچینی و همکاران [۱۷]، ابتدا روشی را ارائه دادند که از یک فرستنده سیگنال^۱ به جای استفاده از سنجنده دوم برای تعیین جابجایی دوبعدی یک بازتابنده گوشه‌ای استفاده شد. همان محققان دو سال بعد [۱۸] روشی را گسترش دادند که با استفاده از آن مؤلفه‌های جابجایی در دو راستا برای یک شیء سیلندری شکل متحرک را شناسایی کردند. مزیت اصلی روش‌های ارائه شده توسط این محققان این بود که استفاده از فرستنده سیگنال منجر به کاهش هزینه‌ها و آسانی نصب سنجنده می‌شود. علاوه بر این، سیگنال‌های مختلف در فرکانس‌های مختلف با همان تجهیزات قبلی قابل استفاده بود.

در سال ۲۰۱۵ [۱۹]، روشی ارائه شد که در آن بردار جابجایی نسبی سه‌بعدی اهداف قابل شناسایی بود. در این روش از سه سنجنده زمینی با طول موج میلی‌متری استفاده شده بود. هر سه سنجنده به‌طور هم‌زمان می‌بایست به جمع‌آوری سیگنال‌های بازگشتی از هدف بپردازند. دقت جابجایی نسبی تعیین شده توسط این روش در حد میلی‌متر بود اما هزینه تهیه سه سنجنده یکی از مشکلات اساسی روش مطرح شده بود.

در این مقاله، از داده‌های شبیه‌سازی شده سنجنده FMCW که در آزمایشگاه سنجش‌ازدور ماکروویو دانشگاه تهران طراحی شده و در حال ساخت است، استفاده می‌شود. کاربرد اصلی سنجنده طراحی شده به‌منظور نظارت بر جابجایی و تجزیه و تحلیل سیگنال‌های آن است. مزیت اصلی روش ارائه شده در این مقاله این است که تنها از یک سنجنده راداری MIMO با طول موج میلی متری که در دو راستا حرکت می‌کند، استفاده می‌شود. مزیت مهم دیگر این است که مدل ریاضی استفاده شده در این مقاله علاوه بر تعیین بردار جابجایی نسبی سه‌بعدی با دقت بالا، موقعیت مطلق سه‌بعدی اهداف را نیز با دقت مناسبی تعیین می‌کند.

سنجنده راداری مورد استفاده یک رادار FMCW با طول موج میلی‌متری است که برای کاربردهای مختلف نظیر رانندگی خودکار، تعیین موقعیت مکانی سه‌بعدی اهداف، تشخیص میزان حرکت اجسام کوچک، تشخیص علائم حیاتی و... مورد استفاده قرار می‌گیرد. رادار موج میلی‌متری FMCW مزایای بسیاری نسبت به سنجنده-

^۱ Transponder

سنجنده صورت می‌گیرد در صورتیکه در سنجنده‌هایی که حرکت آن‌ها در یک جهت است، تشخیص جابجایی فقط در یک راستا صورت می‌گیرد و طراحی ریل دو بعدی نیز بدین منظور است.

سنجنده طراحی شده به صورت دوبعدی توسط موتورهای تعبیه شده، در راستای آزیموت (محور Y) و زنیت (محور Z) حرکت می‌کند. راستای برد نیز به عنوان محور X در نظر گرفته شده است. شکل (۱-الف)، هندسه سیستم راداری زمینی را برای برداشت داده از یک هدف خاص را نشان می‌دهد. در شکل (۱-الف)، صفحه YZ به عنوان صفحه حرکت سنجنده در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱-ب) نیز صفحه حرکت سنجنده به تنهایی نشان داده شده است و سنجنده می‌تواند روی هر یک از نقاط مستقر در صفحه YZ که دارای مختصات دوبعدی هستند، قرار گیرد. نقاط نمایش داده شده به عنوان نمونه‌ای از نقاطی که سنجنده می‌تواند در آن مستقر شود، در نظر گرفته شده است. هر نقطه که سنجنده روی آن قرار می‌گیرد، دارای یک موقعیت خاص آزیموت (X_s) و زنیت (Z_s) است. اگر طول حرکت سنجنده در راستای آزیموت و زنیت به عنوان L در نظر گرفته شود، مقدار Y_s و Z_s در محدوده $[0, L]$ متغیر است. حرف 'O' در شکل (۱)، مبدأ سیستم مختصات مورداستفاده را نشان می‌دهد. سنجنده از اولین نقطه موجود در اولین ردیف که مبدأ سیستم مختصات است، شروع به حرکت می‌کند و سپس به سمت نقطه بعدی حرکت می‌کند. این فرایند تا زمانی که سنجنده به آخرین نقطه ردیف اول برسد، ادامه دارد. در هر نقطه قرارگیری، سنجنده برای چند ثانیه در مکان خود بدون حرکت متوقف می‌شود، شروع به ثبت و ذخیره سیگنال‌های دریافتی می‌کند و سپس به سمت نقطه بعدی حرکت می‌کند. سنجنده سیگنال را توسط دو آنتن فرستنده ارسال و سیگنال بازگشتی را با چهار آنتن گیرنده دریافت می‌کند. زمانی که جمع‌آوری داده در سطح اول به پایان رسید، سنجنده به سمت سطر بالاتر در جهت محور زنیت (Z) حرکت می‌کند و فرایند جمع‌آوری داده در سطر بعدی را دوباره تکرار می‌کند. جمع‌آوری داده زمانی خاتمه پیدا می‌کند که سنجنده در تمام نقاط موجود در صفحه YZ مستقر شده و سیگنال ذخیره کرده باشد. میزان گام‌های حرکتی سنجنده در جهت آزیموت و زنیت به ترتیب dA و dZ در نظر گرفته می‌شود. در هر موقعیت

قرارگیری سنجنده، هشت سیگنال ذخیره می‌شود فاصله بین آنتن‌ها بسیار کم بوده و برابر با d است. اگر تعداد گام‌های حرکت سنجنده در راستای آزیموت و زنیت به ترتیب m و n باشند، مجموعه تعداد سیگنال‌های ذخیره شده توسط سنجنده برابر با $8 \times m \times n$ است.

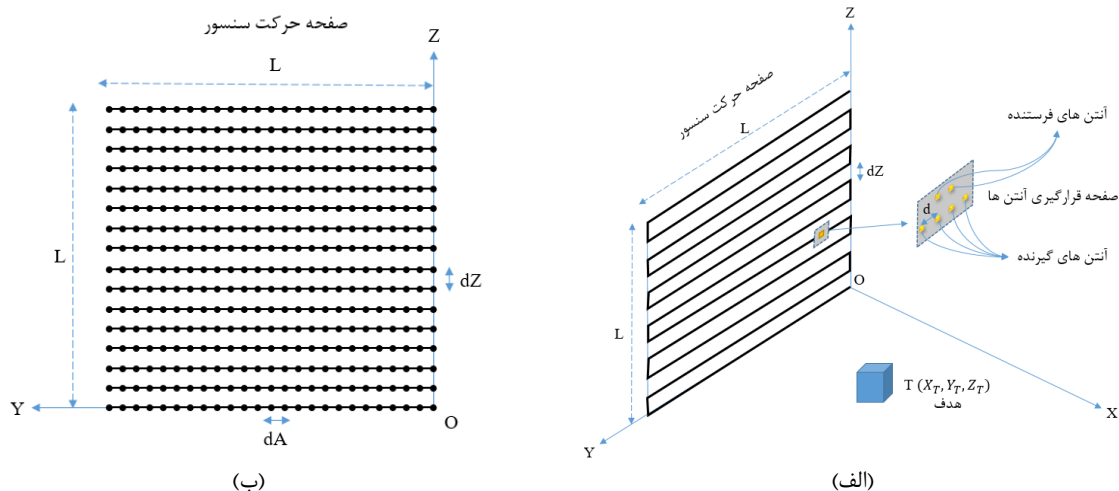
۳- مدل داده سیگنال راداری FMCW

در سیستم‌های راداری به منظور تعیین فاصله در راستای برد، موج الکترومغناطیس در محیطی که اهداف در آن قرار دارد، منتشر می‌شود. سپس اهداف موجود، سیگنال ارسالی را منعکس می‌کنند و آنتن گیرنده سیگنال بازگشتی را ضبط و ذخیره می‌کند. شکل (۲) نمودار ساده یک سیستم راداری را نشان می‌دهد. میکسر دستگاهی است که دارای دو درگاه ورودی و یک درگاه خروجی است. خروجی میکسر سیگنالی است که فرکانس لحظه‌ای آن با اختلاف فرکانس دو سیگنال ورودی و فاز آن با اختلاف فاز دو سیگنال ورودی برابر است. به عنوان مثال، در رابطه (۱)، X_1 و X_2 دو سیگنال ورودی به میکسر هستند و خروجی آن سیگنال X_{out} است.

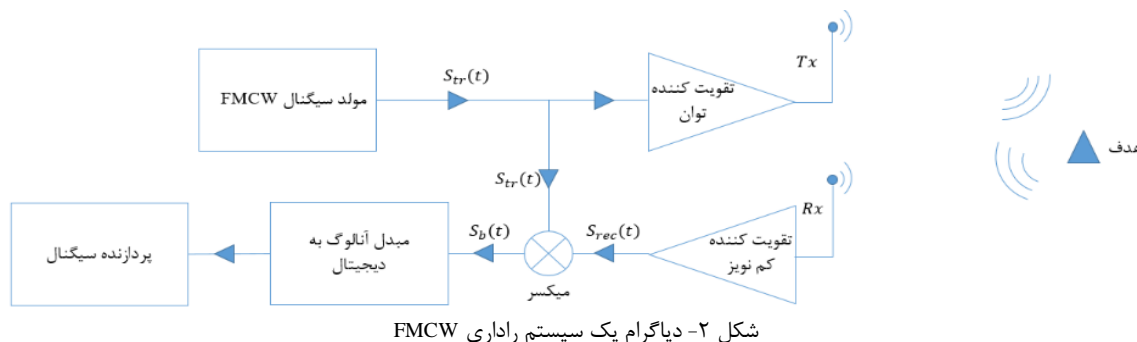
$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \sin(\omega_1 t + \phi_1) \\ X_2 &= \sin(\omega_2 t + \phi_2) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \quad (1)$$

$$X_{out} = \sin[(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)]$$

شکل (۳)، سیگنال ارسالی و دریافتی را که توسط یک هدف منعکس شده است را نشان می‌دهد. سیگنال دریافتی یک نسخه متأخر از سیگنال ارسالی است. سیگنال‌های ارسالی توسط رادارهای FMCW، چرپ نام دارد. سیگنال چرپ یک سیگنال سینوسی است که فرکانس آن به صورت خطی از مقدار f_{min} تا f_{max} با گذشت زمان، افزایش می‌یابد. شکل (۳-الف) دنباله‌ای از چرپ‌ها را در حوزه دامنه نشان می‌دهد. چرپ توسط پارامترهای فرکانس ابتدایی (f_{min})، پهنای باند (B) و طول پالس (T_c) مشخص می‌شود.



شکل ۱- نحوه تصویربرداری، جمع‌آوری داده و حرکت سیستم راداری زمینی (الف) سیستم مختصات سنجنده (ب) صفحه حرکت سنجنده



مولد سیگنال FMCW، چرپ‌های دندان اره‌ای^۳ را ایجاد می‌کند که فرکانس آن توسط (۳) بیان می‌شود:

$$f(t) = f_{\min} + \frac{B}{T_c} \cdot t \quad 0 < t \leq T_c \quad (3)$$

f_{\min} فرکانس آغازین سیگنال است. با انتگرال‌گیری از رابطه (۳) در حوزه زمان و حل آن، فاز سیگنال ارسالی به صورت زیر به دست می‌آید که در آن مقدار فاز اولیه است:

$$\phi_t = \phi_0 + 2\pi \int_0^t f(t) dt = 2\pi f_{\min} t + \pi \frac{B}{T_c} t^2 \quad 0 < t \leq T_c \quad (4)$$

در نتیجه سیگنال ارسالی یک سیگنال چرپ مختلط است که توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$S_{tr}(t) = A \exp \left(j \left(2\pi f_{\min} t + \pi \frac{B}{T_c} t^2 \right) \right) \quad (5)$$

نرخ چرپ نیز به صورت میزان افزایش فرکانس سیگنال در واحد زمان تعریف می‌شود. شکل (۳-ب) مجموعه‌ای از چند چرپ ارسالی و بازگشتی را در حوزه فرکانس نمایش می‌دهد. نرخ چرپ یک مقدار مثبت است و طول پالس نیز مدت زمانی است که فرکانس سیگنال ارسالی از مقدار f_{\min} تا f_{\max} تغییر می‌کند. رابطه (۲) رابطه بین پارامترهای اصلی یک چرپ را بیان می‌کند:

$$B = f_{\max} - f_{\min} = \alpha T_c \quad (2)$$

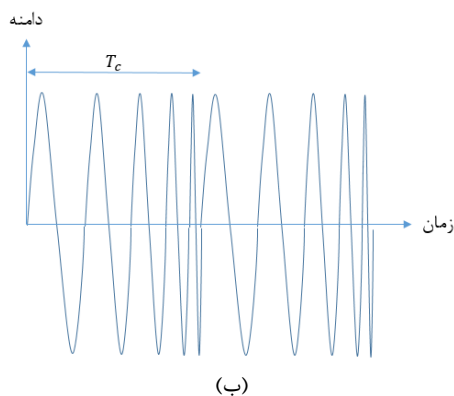
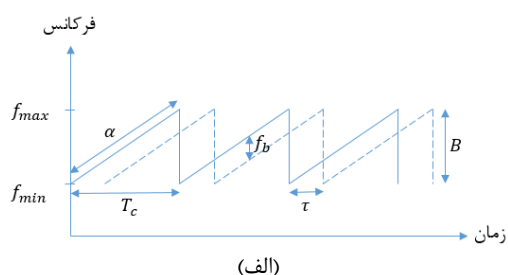
آنتن گیرنده، سیگنال‌های بازگشتی از محیط را ذخیره کرده و با سیگنال‌های ارسالی مقایسه می‌کند. سپس سیگنال‌های ارسالی و دریافتی در میکسر با یکدیگر ادغام شده و خروجی حاصل از آن سیگنال دیچرپ^۱ یا ضربان^۲ نام دارد. سیگنال ضربان حاوی اطلاعاتی درباره اهداف موجود در محیط است. تاخیر زمانی (τ) در سیگنال بازگشتی به اختلاف فرکانس بین مجموعه چرپ‌های ارسالی و دریافتی تبدیل می‌شود.

^۳ Saw-tooth

^۱ Dechirp
^۲ Beat

A دامنه سیگنال بازگشتی است که وابسته به مقدار سطح مقطع راداری^۱ (RCS) اهداف موجود در محیط است و مقدار t زمانی است که در محدوده $[0, T_c]$ قرار دارد. سیگنال بازگشتی نیز یک نسخه متاخر از چرپ ارسالی است که توسط رابطه زیر بیان می شود:

$$S_{rec}(t) = A \exp \left(j \left(2\pi f_{min}(t - \tau) + \pi \frac{B}{T_c} (t - \tau)^2 \right) \right) \quad (6)$$



شکل ۳- مجموعه‌ای از سیگنال‌های چرپ دندان اره ای در سیستم راداری FMCW - (الف) حوزه فرکانس - (ب) حوزه دامنه

در روابط بالا $S_{tr}(t)$ و $S_{rec}(t)$ به ترتیب بیانگر سیگنال ارسالی و دریافتی است. پارامتر τ نیز بیانگر زمان طی شده ارسال سیگنال از سنجنده تا هدف است که از رابطه $2R/c$ حاصل می شود. در اینجا R فاصله مکانی بین هدف تا سنجنده و c نیز ثابت سرعت نور است. حاصلضرب چرپ ارسالی و دریافتی، سیگنال دیچرپ یا ضربان است که توسط رابطه زیر بیان می شود:

$$S_b(t) = S_{tr}(t) * S_{rec}(t) = A \exp \left(j \left(2\pi f_{min} t + \pi \frac{B}{T_c} t^2 \right) \right) - A \exp \left(j \left(2\pi f_{min} (t - \tau) + \pi \frac{B}{T_c} (t - \tau)^2 \right) \right) = A \exp \left(j \left(2\pi f_{min} \tau + \frac{2\pi B}{T_c} t\tau - \pi \frac{B}{T_c} \tau^2 \right) \right) \quad (7)$$

جمله سوم در توان نمایی رابطه (۷) را می توان نادیده گرفت زیرا مقدار τ به طور معمول کسر کوچکی از مقدار زمان کل چرپ است. در نتیجه مقدار عددی τ^2/T_c بسیار کوچک بوده و تقریباً نزدیک صفر است. با استفاده از روش های تجزیه و تحلیل تبدیل فوریه، فرکانس و فاز سیگنال ضربان تخمین زده می شود.

برای تعیین فرکانس و فاز سیگنال ضربان از رابطه (۷)، باید از این سیگنال نمونه برداری صورت گیرد. فرکانس و فاز سیگنال ضربان، با اعمال تبدیل فوریه گسسته روی آن محاسبه می شود. با جستجوی بیشترین مقدار سیگنالی که تبدیل فوریه روی آن اعمال شده است، مقدار فاز و دامنه سیگنال ضربان تعیین می شود. بدین صورت هدفی که سیگنال ارسالی را منعکس کرده، در نمونه b_m ام سیگنال قرار دارد. تفکیک در راستای برد برای یک سیستم راداری FMCW به صورت زیر حاصل می شود:

$$\Delta R = c/2B \quad (8)$$

علاوه بر آن، فاصله در راستای برد از سنجنده تا هدف توسط رابطه زیر به دست می آید:

$$R = b_m \cdot \Delta R \quad (9)$$

همانطور که در رابطه بالا دیده میشود، قدرت تفکیک برد فقط به پهنای باند (B) سیگنال وابسته است. توان سیگنال دریافتی با استفاده از رابطه زیر با توان سیگنال ارسالی در ارتباط است:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (10)$$

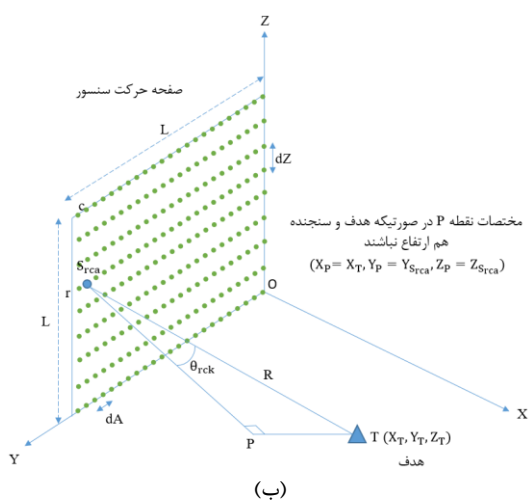
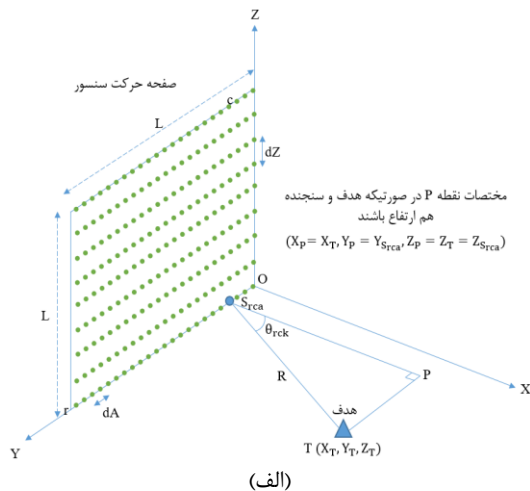
رابطه (۱۰) به عنوان معادله رادار شناخته می شود. در این معادله، P_t بیشترین توان سیگنال ارسالی و G_r و G_t به ترتیب مقدار بهره آنتن فرستنده و گیرنده است. σ نیز سطح مقطع راداری هدف و λ طول موج سیگنال ارسالی است. بیشترین بردی که توسط سنجنده قابل تشخیص است از رابطه زیر تعیین می شود:

$$R_{max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 P_r}} \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، توان دریافتی وابسته به نویز گیرنده (NF)، نویز موجود در توان آنتن فرستنده (P_n) و نسبت

^۱ Radar Cross Section

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{rc1} = [X_{S_{rc1}}, Y_{S_{rc1}}, Z_{S_{rc1}}] = \\ [0, (c-1) * dA, (r-1) * dZ] \\ S_{rc2} = [X_{S_{rc2}}, Y_{S_{rc2}}, Z_{S_{rc2}}] = \\ [0, (c-1) * dA + d, (r-1) * dZ] \\ S_{rc3} = [X_{S_{rc3}}, Y_{S_{rc3}}, Z_{S_{rc3}}] = \\ [0, (c-1) * dA + 2d, (r-1) * dZ] \\ S_{rc4} = [X_{S_{rc4}}, Y_{S_{rc4}}, Z_{S_{rc4}}] = \\ [0, (c-1) * dA + 3d, (r-1) * dZ] \end{array} \right. \quad (13)$$



شکل ۴- تعیین موقعیت مکانی سنجنده بر اساس سطر و ستون مکان قرارگیری و نمایش زاویه مشاهداتی اندازه‌گیری شده برای یک هدف مشابه در دو موقعیت قرارگیری متفاوت سنجنده در سطر و ستون متفاوت - الف) سنجنده در سطر اول - ب) سنجنده در سطرهای میانی

۴-۲- تعیین زاویه سیگنال منعکس شده از هدف نسبت به آنتن گیرنده

برای تعیین زاویه سیگنال بازگشتی از هدف که توسط آنتن گیرنده دریافت می‌شود، حداقل دو آنتن گیرنده نیاز است. اختلاف فاصله بین هدف تا هر یک از آنتن‌های گیرنده، باعث تغییر در مقدار فاز میشود. آنتن فرستنده

سیگنال به نویز (SNR) است. توان دریافتی (P_r) برابر با مجموع پارامترهای معرفی شده است و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_r = NF + P_n + SNR \quad (12)$$

۴- مدل ریاضی مورد استفاده

در این بخش ابتدا روابط تعیین موقعیت مکانی مکان سنجنده بر روی صفحه حرکت خود و سپس نحوه اندازه‌گیری زاویه سیگنال نسبت به هدف با توجه به مکان قرارگیری آنتن گیرنده بیان می‌گردد. از این زوایا به عنوان مشاهدات در مرحله بعد استفاده می‌شود. سپس با استفاده از تعیین رابطه هندسی زوایای مشاهده شده، از روش سرشکنی کمترین مربعات برای تعیین موقعیت مطلق سه بعدی هدف استفاده می‌شود.

۴-۱- تعیین موقعیت مکانی سنجنده

در مدل ریاضی استفاده شده، موقعیت مکانی سنجنده به عنوان پارامترهای معلوم در نظر گرفته می‌شود. شکل ۴- الف) و ۴- ب) یک هدف مشابه را نشان می‌دهد که سنجنده در دو موقعیت مکانی متفاوت، در حال ارسال و دریافت سیگنال است. شکل ۴- الف) زمانیکه سنجنده و هدف هم ارتفاع هستند و شکل ۴- ب) زمانیکه که سنجنده و هدف هم ارتفاع نیستند را نمایش می‌دهد.

اگر صفحه حرکت سنجنده و نقاطی که سنجنده در روی آن برای ارسال و دریافت سیگنال متوقف می‌شود دارای r سطر و c ستون باشد، موقعیت سه‌بعدی سنجنده در سطر m و ستون a و برای آنتن شماره a در شکل ۴) با علامت S_{rca} نمایش داده شده است. از آنجایی که چهار آنتن گیرنده در سنجنده وجود دارد، مقدار پارامتر a می‌تواند ۱، ۲، ۳ و ۴ باشد. فاصله بین آنتن‌های گیرنده d است، در نتیجه مختصات سه‌بعدی سنجنده برای هر یک از آنتن‌ها در سطر m و ستون a از صفحه YZ که سنجنده در آن حرکت می‌کند توسط روابط زیر تعیین می‌شود:

پیدا می‌کند. اگر فاصله بین آنتن‌های گیرنده به صورت $d = \lambda/2$ فرض شود، با جایگذاری این مقدار در رابطه (۱۴)، زاویه سیگنال منعکس شده نسبت به آنتن گیرنده توسط رابطه (۱۵) به دست می‌آید:

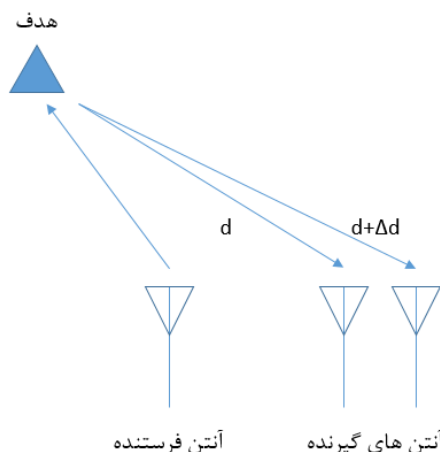
$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\omega}{\pi}\right) \quad (15)$$

بیشترین گستره دیدی که توسط آنتن‌های گیرنده با فاصله d از یکدیگر، جاروب می‌شوند از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{2\pi d \sin(\theta)}{\lambda} < \pi \Rightarrow \theta < \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d}\right) \quad (16)$$

$$\Rightarrow \theta_{\max} = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d}\right)$$

بیشترین گستره دید ($\pm 90^\circ$) زمانی است که فاصله بین آنتن‌ها $\lambda/2$ باشد. چنانچه بیش از یک هدف در محیط انتشار سیگنال حضور داشته باشد، آنتن‌های گیرنده بیشتری نیز نیاز است. فرض کنید که تعداد n هدف در محیط اندازه گیری وجود داشته باشد. در این صورت، سنجنده راداری باید دارای $n+1$ آنتن گیرنده باشد تا بتواند اهداف موجود در محیط اندازه گیری را از یکدیگر به صورت مجزا متمایز کند.



شکل ۵- تعیین زاویه سیگنال منعکس شده از هدف نسبت به آنتن گیرنده در سیستم‌های راداری MIMO

چنانچه جابجایی یک هدف کمتر از $\frac{\lambda}{4}$ طول موج (سنجنده) باشد، پیکسلی که هدف در آن قرار دارد، قبل و بعد از جابجایی تغییری پیدا نمی‌کند و با استفاده از رابطه $d = \Delta\varphi \times \frac{\lambda}{4\pi}$ به راحتی میزان جابجایی محاسبه می‌شود. حال چنانچه مقدار جابجایی هدف بیشتر از $\frac{\lambda}{4}$ (رادیان) باشد، ابهام فاز رخ می‌دهد. برای حل ابهام فاز روش‌های

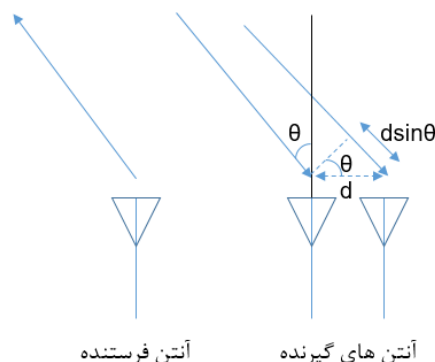
مجموعه‌ای از چرپ‌ها را ارسال می‌کند. سپس هر یک از گیرنده‌ها، سیگنال منعکس شده از هدف را دریافت می‌کنند. با اعمال تبدیل فوریه دوبعدی روی سیگنال ضربان، سیگنال دریافتی توسط آنتن گیرنده دارای یک مقدار قله در یک نمونه مشابه (نمونه b_m) اما با مقدار فاز مختلف است. با استفاده از تفاضل فازهای اندازه گیری شده توسط هر آنتن ($\Delta\omega$), زاویه سیگنال منعکس شده از هدف نسبت به آنتن گیرنده (θ) محاسبه می‌شود. اگر مقدار فاز نمونه b_m در سیگنال‌هایی که توسط آنتن گیرنده اول و دوم دریافت می‌شوند به ترتیب ω_1 و ω_2 باشند و فاصله بین آنتن‌های گیرنده نیز d باشد، بر اساس شکل (۵)، زاویه سیگنال منعکس شده از هدف نسبت به آنتن گیرنده با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda}$$

$$\xrightarrow{\Delta d = d \sin(\theta)} \Delta\omega = \frac{2\pi d \sin(\theta)}{\lambda} \quad (14)$$

$$\Rightarrow \theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\omega}{2\pi d}\right)$$

در مقدار زاویه $\theta = 0$, $\Delta\omega$ بیشترین حساسیت به تغییرات در θ را دارد. هرچه مقدار θ افزایش یابد، حساسیت $\Delta\omega$ به تغییرات θ کاهش می‌یابد. بنابراین هر چه θ افزایش یابد، خطای بیشتری در تعیین زاویه نمود



۳-۴- تعیین موقعیت مطلق هدف

اولین مرحله محاسباتی با استفاده از مشاهدات در تعیین موقعیت مطلق سه بعدی اهداف، تعیین زاویه سیگنال منعکس شده از هدف نسبت به آنتن گیرنده است.

منعکس شده از هدف نسبت به موقعیت مکانی آنتن گیرنده که در سطر m و ستون c صفحه YZ قرار دارد، توسط روابط زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned} \theta_{rc1} &= \sin^{-1} \left(\frac{\omega_{rc2} - \omega_{rc1}}{\pi} \right) \\ \theta_{rc2} &= \sin^{-1} \left(\frac{\omega_{rc3} - \omega_{rc2}}{\pi} \right) \\ \theta_{rc3} &= \sin^{-1} \left(\frac{\omega_{rc4} - \omega_{rc3}}{\pi} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

این فرآیند برای تمامی موقعیت‌های مکانی سنجنده (S_{rca}) انجام می‌گیرد. زاویه θ_{rck} برای دو موقعیت مکانی مختلف سنجنده با یک هدف مشابه، در شکل‌های (۴-الف) و (۴-ب) نشان داده شده است.

همانطور که قبلاً ذکر شد علاوه بر تعیین موقعیت مکانی هدف در راستای برد با دقت پایین، مشاهده دیگر زاویه θ_{rck} است که توسط سنجنده راداری زمینی MIMO با طول موج میلیمتری می‌توان اندازه‌گیری کرد. در سیگنال دریافت شده میتوان نمونه با بیشترین مقدار دامنه را پیدا کرد و با استفاده از رابطه ی (۱۰)، فاصله سنجنده تا هدف را در راستای برد تعیین کرد اما دقت فاصله به دست آمده مناسب نیست و تعیین موقعیت سه بعدی هدف نیز قابل انجام نیست. از آنجایی که سنجنده طراحی شده از امواج میلیمتری استفاده می‌کند، دقت تعیین موقعیت مطلق و نسبی باید در حد میلی متر و کمتر نیز باشد.

با استفاده از هندسه اندازه‌گیری زاویه که در شکل (۴) نشان داده شده است، زاویه مشاهداتی θ_{rck} از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \tan(\theta_{rck}) &= \frac{PT}{PS_{rck}} \Rightarrow \\ \tan(\theta_{rck}) &= \frac{(Y_T - Y_{S_{rck}})}{\sqrt{(X_T - X_{S_{rck}})^2 + (Z_T - Z_{S_{rck}})^2}} \quad (18) \\ \theta_{rck} &= \tan^{-1} \left(\frac{(Y_T - Y_{S_{rck}})}{\sqrt{(X_T - X_{S_{rck}})^2 + (Z_T - Z_{S_{rck}})^2}} \right) \quad (19) \end{aligned}$$

$X_{S_{rck}}$ همیشه مساوی صفر است چون سنجنده در صفحه YZ حرکت می‌کند و (X_T, Y_T, Z_T) نیز موقعیت مکانی مجهول هدف است. زاویه θ_{rck} با استفاده از رابطه (۱۷) که از فاز سیگنال‌های آنتن گیرنده استفاده می‌کند، حاصل می‌شود.

مختلفی ابداع شده است که هر کدام دقت‌های مختلفی دارند و عموماً در سنجنده‌های با طول موج بزرگ و در باندهای مختلف فرکانسی (C, X, P و Ku) استفاده می‌شود. سنجنده طراحی شده طول موج بسیار کمتری نسبت به باندهای ذکر شده دارد و روش‌های حل ابهام فاز، توانایی تعیین تعداد سیکل‌های کامل موج را ندارد بنابراین از یک روش هندسی برای تعیین موقعیت و تعیین میزان جابجایی استفاده شده است.

مقصود اصلی از تعیین موقعیت مطلق اهداف قبل و بعد از جابجایی، تشخیص میزان جابجایی عارضه در سه راستا است. موقعیت مکانی مطلق هدف قبل و بعد از جابجایی تعیین می‌شود و با تفاضل مختصات مؤلفه‌ها، میزان جابجایی نسبی حاصل می‌شود. در نتیجه، یکی از اهداف اصلی تعیین موقعیت مطلق، عدم توانایی روش‌های حل ابهام فاز در تعیین ابهام فاز است. هدف دیگر نیز تعیین بردار جابجایی نسبی هدف به صورت سه بعدی است.

همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، تک هدف T به عنوان هدفی که موقعیت سه بعدی آن مجهول است، در نظر گرفته شده است. در هر موقعیت مکانی که سنجنده در آن قرار می‌گیرد، به دلیل وجود چهار آنتن گیرنده، سه اختلاف فاز اندازه‌گیری میشود و در نتیجه سه زاویه نیز اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از رابطه (۱۵)، θ_{rck} یک زاویه فضایی بین دو راستا است. راستای اول، خط دید سنجنده تا هدف (خط $S_{rca}T$) و راستای دوم خط عمود بر صفحه حرکت سنجنده در محل قرارگیری سنجنده (نقطه S_{rca}) است به طوریکه مثلث $S_{rca}PT$ یک مثلث قائم‌الزاویه را تشکیل دهد که نقطه P راس قائم آن باشد. زیروندهای r و c قبلاً معرفی شدند و k نیز شماره زاویه تعیین شده بر اساس فاز آنتن‌های گیرنده اول تا چهارم و در موقعیت مکانی سنجنده S_{rca} است که می‌تواند مقادیر (۳، ۲، ۱) $k =$ داشته باشد. چنانچه زاویه θ_{rck} در سمت راست خط عمود $S_{rca}P$ باشد مانند شکل (۴-الف)، مقدار زاویه θ_{rck} مثبت اما اگر زاویه θ_{rck} در سمت چپ این خط باشد، مقدار زاویه θ_{rck} منفی بدست می‌آید.

فاز سیگنال بازگشتی در موقعیت مکانی سنجنده S_{rca} با استفاده از جستجوی نمونه‌ای که بیشترین مقدار دامنه (نمونه b_m) را دارد، تعیین می‌شود. $\omega_{rc1}, \omega_{rc2}, \omega_{rc3}$ و ω_{rc4} فازهای تعیین شده برای چهار آنتن گیرنده در موقعیت مکانی S_{rca} هستند. در نتیجه سه زاویه سیگنال

تعداد گام های سنجنده در صفحه YZ برابر با $m \times n$ است و در هر موقعیت سنجنده، سه زاویه θ_{rck} مشاهده می شود. در نتیجه، ابعاد ماتریس \vec{J} برابر با $3 \times m \times n$ سطر و سه ستون است. تعداد ستون ها برابر با تعداد پارامترهای مجهول است. بر اساس روابط (۲۱)، (۲۲) و (۲۳)، ماتریس \vec{J} به صورت زیر بیان می شود:

$$\vec{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_{111}}{\partial X_T} & \frac{\partial \theta_{111}}{\partial Y_T} & \frac{\partial \theta_{111}}{\partial Z_T} \\ \frac{\partial \theta_{112}}{\partial X_T} & \frac{\partial \theta_{112}}{\partial Y_T} & \frac{\partial \theta_{112}}{\partial Z_T} \\ \frac{\partial \theta_{113}}{\partial X_T} & \frac{\partial \theta_{113}}{\partial Y_T} & \frac{\partial \theta_{113}}{\partial Z_T} \\ \frac{\partial \theta_{121}}{\partial X_T} & \frac{\partial \theta_{121}}{\partial Y_T} & \frac{\partial \theta_{121}}{\partial Z_T} \\ \frac{\partial \theta_{122}}{\partial X_T} & \frac{\partial \theta_{122}}{\partial Y_T} & \frac{\partial \theta_{122}}{\partial Z_T} \\ \frac{\partial \theta_{123}}{\partial X_T} & \frac{\partial \theta_{123}}{\partial Y_T} & \frac{\partial \theta_{123}}{\partial Z_T} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \theta_{rc1}}{\partial X_T} & \frac{\partial \theta_{rc1}}{\partial Y_T} & \frac{\partial \theta_{rc1}}{\partial Z_T} \\ \frac{\partial \theta_{rc2}}{\partial X_T} & \frac{\partial \theta_{rc2}}{\partial Y_T} & \frac{\partial \theta_{rc2}}{\partial Z_T} \\ \frac{\partial \theta_{rc3}}{\partial X_T} & \frac{\partial \theta_{rc3}}{\partial Y_T} & \frac{\partial \theta_{rc3}}{\partial Z_T} \end{bmatrix}_{(3 \times m \times n, 3)} \quad (24)$$

$$\frac{\partial \theta_{rck}}{\partial X_T} = \frac{(Y_{S_{rck}} - Y_T) \cdot (X_T - X_{S_{rck}})}{\sqrt{(X_T - X_{S_{rck}})^2 + (Z_T - Z_{S_{rck}})^2} \cdot [(X_T - X_{S_{rck}})^2 + (Z_T - Z_{S_{rck}})^2 + (Y_{S_{rck}} - Y_T)^2]} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \theta_{rck}}{\partial Y_T} = \frac{\sqrt{(X_{S_{rck}} - X_T)^2 + (Z_T - Z_{S_{rck}})^2}}{(X_{S_{rck}} - X_T)^2 + (Z_T - Z_{S_{rck}})^2 + (Y_T - Y_{S_{rck}})^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \theta_{rck}}{\partial Z_T} = \frac{(Y_{S_{rck}} - Y_T) \cdot (Z_T - Z_{S_{rck}})}{\sqrt{(X_{S_{rck}} - X_T)^2 + (Z_T - Z_{S_{rck}})^2} \cdot [(X_{S_{rck}} - X_T)^2 + (Z_T - Z_{S_{rck}})^2 + (Y_{S_{rck}} - Y_T)^2]} \quad (23)$$

ستونی است که تعداد سطرهای آن برابر با تعداد مشاهدات زاویه یعنی $3 \times m \times n$ است.

$$\vec{K} = \alpha_{rck(obs)} - \alpha_{rck(cal)} \quad (25)$$

در هر بار تکرار حلقه، مقدار محاسبه شده برای مجهولات به عنوان مقدار اولیه برای حلقه تکرار بعدی در نظر گرفته می شود. این فرایند تا زمانی که اختلاف بین مقادیر بدست آمده مجهولات و مقادیر اولیه کمتر 10^{-6} از باشند، ادامه می یابد. خروجی نهایی حل این مسئله موقعیت مکانی مطلق سه بعدی هدف T با دقت بالایی است.

مرحله آخر تعیین موقعیت مطلق هدف T است. بر اساس روش سرشکنی کمترین مربعات، موقعیت مکانی سه بعدی هدف T چنانچه بردار $\vec{T}_0 = (X_{0T}, Y_{0T}, Z_{0T})$ به عنوان مقدار اولیه مکان مجهول هدف T در نظر گرفته شود، با استفاده از حل رابطه زیر به دست می آید:

$$\vec{T} = (\vec{J}^T \cdot \vec{J})^{-1} \cdot \vec{J}^T \cdot \vec{K} + \vec{T}_0 \quad (20)$$

رابطه سرشکنی کمترین مربعات (۲۰) به صورت تکراری حل می شود. بدین منظور، یک مقدار اولیه $\vec{T}_0 = (X_{0T}, Y_{0T}, Z_{0T})$ برای موقعیت مکانی هدف در نظر گرفته می شود. مقدار اولیه به صورت اختیاری انتخاب می شود اما هرچه مقدار اولیه انتخاب شده به مقدار واقعی موقعیت مکانی هدف نزدیک تر باشد، تعداد حلقه های تکرار برای حل مسئله کمترین مربعات، کمتر خواهد بود.

در رابطه (۲۰)، ماتریس \vec{J} مشتق مشاهدات نسبت به پارامترهای مجهول است که مولفه های آن با استفاده از مشتق گیری از رابطه (۱۹) نسبت به مجهولات مکانی X_T ، Y_T و Z_T به دست می آید. مولفه های به دست آمده ماتریس \vec{J} در روابط (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) بیان شدند.

ماتریس \vec{K} نیز اختلاف بین زاویه مشاهداتی $\theta_{rck(obs)}$ و مقدار زاویه محاسباتی $\theta_{rck(cal)}$ است. زاویه مشاهداتی با استفاده از سیگنال دریافتی آنتن های گیرنده و توسط رابطه (۱۷) به دست می آید که در تمام حلقه های تکرار مقدار آن ثابت است. زاویه محاسباتی نیز با استفاده از موقعیت مکانی سنجنده در هر گام و توسط رابطه (۱۹) محاسبه می شود که مقدار آن با توجه به اینکه در هر حلقه حل معادلات سرشکنی کمترین مربعات، مقدار اولیه نیز بروز می شود، تغییر می کند. ماتریس \vec{K} ماتریس تک

۵- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

کرد و از اطلاعات فاز سیگنال برای تعیین زاویه برخورد سیگنال به هدف استفاده می‌شود.

در ادامه، سنجنده راداری زمینی MIMO با طول موج میلیمتری با استفاده از جعبه ابزار سیستم آرایه فازی^۱ در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. در این مقاله دو هدف اصلی در نظر گرفته شده است. هدف اول از شبیه‌سازی سنجنده و استفاده از مدل ریاضی ذکر شده، تعیین موقعیت مطلق سه بعدی یک هدف با دقت مناسب است. هدف بعدی نیز تعیین بردار جابجایی نسبی هدف به صورت سه بعدی، بعد از جابجایی مکان قرارگیری هدف است. بدین منظور دو سری آزمایش شبیه‌سازی شده برای تعیین موقعیت مطلق و تعیین موقعیت نسبی در نظر گرفته شد.

در آزمایش اول، سه هدف در موقعیت‌های مکانی متفاوت مطابق شکل (۶) شبیه‌سازی شد. در هر تصویر، یک هدف قرار گرفته است. هدف اول در راستای آزیموت در وسط صفحه YZ و در نقطه صفر سطح مبنای ارتفاعی و دقیقاً روبروی سنجنده قرار گرفته است. هدف دوم پایین‌تر از کمترین ارتفاع سنجنده در راستای آزیموت و در سمت چپ سنجنده قرار گرفته است. هدف آخر نیز بالاتر از بیشترین ارتفاع سنجنده و در سمت راست سنجنده قرار گرفته است. بدین صورت سه هدف در موقعیت‌های مکانی مختلف در سمت‌های چپ و راست و در بالا و پایین سنجنده مطابق شکل (۶) قرار گرفته‌اند. در زیر هر هدف، موقعیت مکانی آن به ترتیب مؤلفه X ، Y و Z از چپ به راست درج شده است.

طول ریلی که سنجنده در هر دو راستای آزیموت و زنیت (L) بر روی آن حرکت می‌کند، یک متر در نظر گرفته شده است. طول گام‌های سنجنده در هر دو راستای آزیموت (dA) و زنیت (dZ) نیز ۲ سانتی‌متر فرض شده است. در نتیجه، تعداد گام‌های حرکتی سنجنده در راستای آزیموت (n) و زنیت (m) برابر با ۵۰ می‌باشد. در این شبیه‌سازی به دلیل کثرت داده، از داده‌های مربوط به یک فرستنده و چهار آنتن گیرنده استفاده شده است. متعاقباً تعداد داده‌های مورد استفاده برابر با $۷۵۰۰ = ۵۰ \times ۵۰ \times ۴$ است که از آن می‌توان ۷۵۰۰ مشاهده زاویه برخورد استخراج کرد.

در این بخش ابتدا به بیان مشخصات سنجنده شبیه‌سازی شده و داده مورد استفاده پرداخته می‌شود. سپس به ایجاد سیگنال به صورت شبیه‌سازی شده طبق روابط گفته شده و تعیین موقعیت هدف می‌پردازیم. در نهایت نیز نتایج بدست‌آمده ارزیابی می‌شوند.

۵-۱- مشخصات داده پیاده‌سازی شده

پارامترهای سنجنده راداری زمینی MIMO موج میلی‌متری به صورت شبیه‌سازی شده در جدول (۱) ارائه شده است. سنجنده در راستای آزیموت و زنیت حرکت می‌کند. آنتن‌های گیرنده و فرستنده این سیستم با فرکانس میانی $۷۷/۳$ گیگاهرتز و پهنای باند ۶۰۰ مگاهرتز به تبادل امواج می‌پردازند. طول ریل حرکت سنجنده در دو راستای حرکت، یک متر است و تعداد آنتن‌های فرستنده و گیرنده به ترتیب ۲ و ۴ آنتن است.

جدول ۱- پارامترهای سنجنده و مشخصات داده شبیه‌سازی شده

| پارامتر | علامت اختصاری | مقدار |
|--------------------------|---------------|-----------------|
| فرکانس آغازین | f_{min} | 77 GHz |
| طول موج | λ | 3.9 mm |
| پهنای باند | B | 600 MHz |
| طول پالس | T_c | 60 μ s |
| نرخ چرپ | α | 10 MHz/ μ s |
| فرکانس نمونه برداری | f_s | 600 MHz |
| فاصله بین آنتن‌ها | d | 1.95 mm |
| قدرت تفکیک در راستای برد | ΔR | 25 cm |
| بیشترین توان فرستنده | P_t | 1.5 milliwatt |
| الگوی فرستنده | G_t | 30 dB |
| الگوی گیرنده | G_r | 30 dB |
| نویز گیرنده | NF | 15 dB |

۵-۲- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

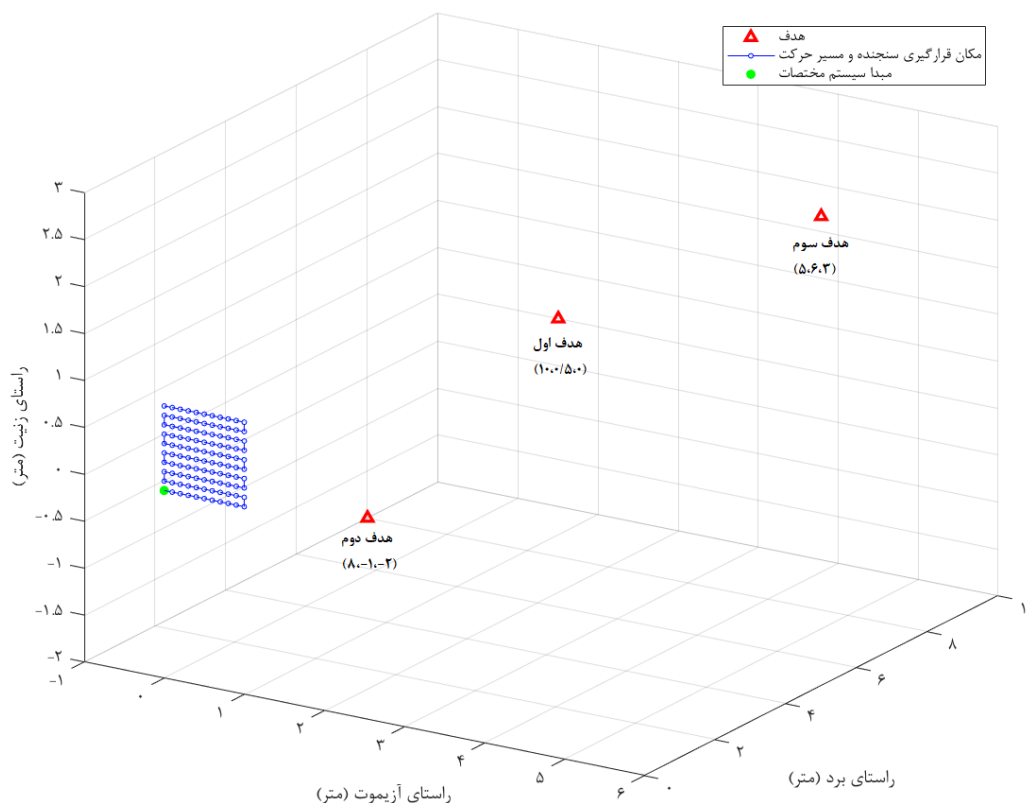
برای شبیه‌سازی فرض شده است که در محیط انتشار سیگنال یک هدف نقطه‌ای قرار دارد. مدل سیگنال خام دریافت شده از هدف نقطه‌ای طبق قسمت انتهایی رابطه (۷) بدست می‌آید و مطابق همین رابطه نیز شبیه‌سازی می‌شود. سیگنال دریافتی به صورت مختلط است و بنابراین اطلاعات آن به دو دسته حقیقی و موهومی تجزیه می‌شود. از سیگنال مختلط می‌توان مقدار فاز را استخراج

^۱ Phased Array System toolbox

در هر تصویر یک هدف با موقعیت‌های مطابق شکل (۶) که مقدار سطح مقطع راداری آن یک مترمربع است، شبیه‌سازی شده است. با استفاده از حل رابطه سرشکنی کمترین مربعات (۲۰)، نتایج حاصل در جدول (۲) ارائه شده است. در این جدول موقعیت مطلق سه بعدی تخمینی با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله، مقدار اولیه برای حل مساله، خطای مکان‌یابی در هر راستا و

خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) ارائه شده است. مقدار RMSE توسط رابطه (۲۶) حاصل می‌شود که در آن X ، Y و Z مقادیر واقعی موقعیت مکانی هدف هستند و \hat{X} ، \hat{Y} و \hat{Z} مقادیر تخمین زده شده حاصل از سرشکنی کمترین مربعات هستند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{(X - \hat{X})^2 + (Y - \hat{Y})^2 + (Z - \hat{Z})^2}{3}} \quad (26)$$



شکل ۶- موقعیت مکانی اهداف نسبت به سنجنده و موقعیت قرارگیری سنجنده در سیستم مختصات

جدول ۲- موقعیت مکانی مطلق تخمین زده شده اهداف به صورت سه بعدی و خطای مربوط به هر هدف (واحد: متر)

| | مؤلفه مکانی | موقعیت واقعی | موقعیت تخمینی | مقدار اولیه | خطای مکان‌یابی | RMSE |
|---------|-------------|--------------|---------------|-------------|----------------|----------|
| هدف اول | X | ۱۰ | ۹/۹۹۹۳۲۲ | ۹/۵۴ | ۰/۰۰۰۶۷۸ | ۰/۰۰۲۷۵۳ |
| | Y | ۰/۵ | ۰/۴۹۹۹۵۲ | ۰/۹۳ | ۰/۰۰۰۰۴۸ | |
| | Z | ۰ | ۰/۰۰۴۷۷۲ | ۰/۳۸ | ۰/۰۰۴۷۷۲ | |
| هدف دوم | X | ۸ | ۸/۰۰۰۹۶۸ | ۷/۵۷ | ۰/۰۰۰۹۶۸ | ۰/۰۰۰۸۳۵ |
| | Y | -۱ | -۱/۰۰۰۰۶۸ | -۰/۶۱ | ۰/۰۰۰۰۶۸ | |
| | Z | -۲ | -۱/۹۹۸۹۲۶ | -۱/۶۴ | ۰/۰۰۱۰۷۴ | |
| هدف سوم | X | ۵ | ۴/۹۹۹۶۵۸ | ۵/۵۳ | ۰/۰۰۰۳۴۲ | ۰/۰۰۳۴۳ |
| | Y | ۴ | ۴/۰۰۰۱۳۴ | ۶/۴۷ | ۰/۰۰۰۱۳۴ | |
| | Z | ۳ | ۲/۹۹۴۰۷۲ | ۲/۶۱ | ۰/۰۰۵۹۲۸ | |

در تمامی اهداف، مؤلفه مکانی Z دارای خطای بیشتری نسبت به دو مؤلفه مکانی دیگر است. خطای مکان‌یابی در تمامی اهداف در دو راستای X و Y کمتر از یک میلی‌متر

نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که دقت تعیین موقعیت مطلق سه بعدی برای اهداف اول و سوم در حدود سه میلی‌متر و برای هدف دوم کمتر از یک میلی‌متر است.

مقدار جابجایی از سه مؤلفه مکانی کسر شده است تا اندازه بردارها کوچک شود و اختلاف بین مقدار واقعی و تخمینی به صورت بصری، بهتر دیده شود.

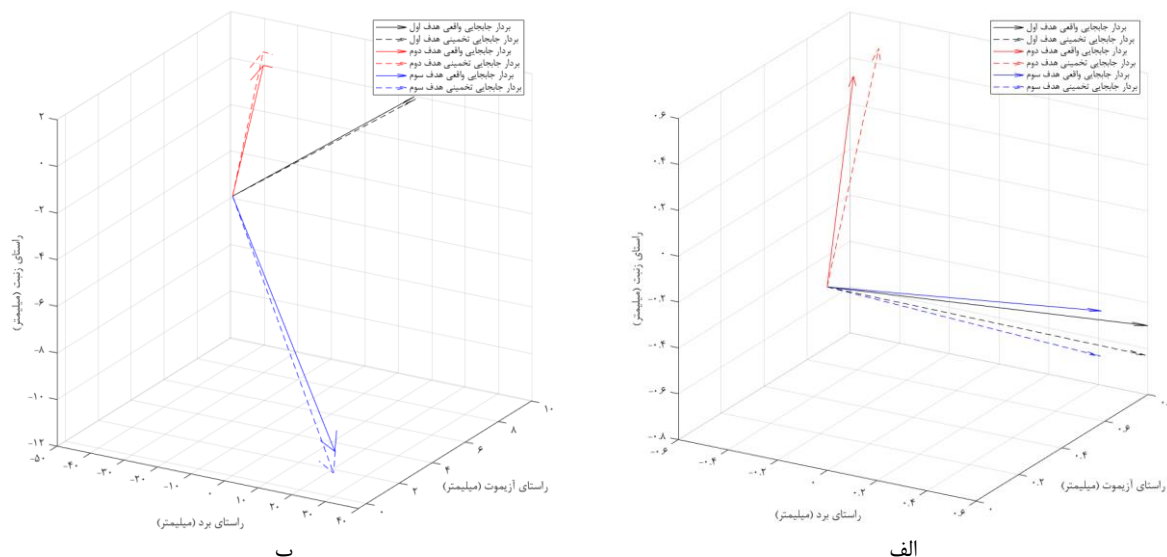
همانطور که در شکل (۷) دیده می‌شود، بزرگی بردار جابجایی تخمین زده شده تقریباً برابر با بردار جابجایی واقعی است و فقط در هدف اول است که این مقدار کمی متفاوت از مقدار واقعی است. راستای بردار تخمینی نیز همسو با بردار جابجایی واقعی است. مطابق شکل (۷-الف) و (۷-ب) در بردار جابجایی تخمینی، مؤلفه مکانی Z بیشترین تاثیر را در خطای بردار جابجایی ایجاد می‌کند و سایر مؤلفه‌های مکانی خطای کمتری را ایجاد کردند و جابجایی نسبی با دقت بسیار بالایی تعیین شده است

جداول (۳) و (۴) جابجایی واقعی و تخمینی اهداف را با استفاده از روش ارائه شده در هر سه راستا به همراه میزان خطای ایجاد شده، به ترتیب برای جابجایی مرحله اول و دوم نشان می‌دهند. در تمامی جابجایی‌ها مقدار خطای ایجاد شده کمتر از نیم میلی‌متر است که دقت بالایی محسوب می‌شود. طبق جدول (۳)، چون مقدار جابجایی کمتر است، میزان خطای ایجاد شده نیز کم است و مطابق جدول (۴) و به خصوص هدف سوم، هر چه مقدار جابجایی بیشتر باشد، خطای ایجاد شده نیز بیشتر است. همانند آزمایش اول، مؤلفه ارتفاعی Z بیشترین خطا را ایجاد می‌کند. مؤلفه‌های مکانی X و Y کمترین میزان خطا را دارند و زمانی که میزان جابجایی کم است، خطای ایجاد شده کمتر از 0.1 میلی‌متر و در بعضی موارد کمتر از 0.01 میلی‌متر است. مؤلفه مکانی Y که جابجایی در راستای آزیموت نیز است، دارای بیشترین دقت نسبت سایر مؤلفه‌های مکانی است. نتایج حاصل نشان داد که روش ارائه شده توانایی تعیین بردار جابجایی نسبی به صورت سه بعدی را بدون محدودیت میزان جابجایی و با دقت بسیار بالا دارد.

و در بعضی موارد کمتر از 0.1 میلی‌متر است اما این خطا برای مؤلفه Z بین 1 تا 6 میلی‌متر متغیر است. با استفاده از نتایج جدول (۲) می‌توان فهمید که مؤلفه مکانی Z بیشترین تاثیر را بر روی کاهش دقت مکانی و افزایش مقدار RMSE دارد.

در آزمایش دوم هدف تعیین دقت جابجایی سه بعدی و تعیین موقعیت نسبی سه بعدی با استفاده از روش ارائه شده و مقایسه آن با تعیین موقعیت مطلق است. در روش‌های مرسوم تعیین جابجایی، از روش‌های تداخل‌سنجی برای تعیین جابجایی فقط در یک راستا (راستای برد) استفاده می‌شود. چنانچه اندازه بردار جابجایی بیشتر از $\lambda/4$ باشد، می‌بایست از روش‌های بازیابی فاز برای تعیین میزان جابجایی استفاده شود. در غیر اینصورت، بدون استفاده از روش‌های بازیابی فاز و با تفاضل مقادیر فاز از یکدیگر، میزان جابجایی قابل تشخیص است. بر خلاف روش‌های مرسوم، در این مقاله روشی ارائه شده است که علاوه بر تعیین موقعیت مطلق اهداف با دقت مناسب، بردار جابجایی نسبی را به صورت سه بعدی و با دقت مناسب تعیین می‌کند.

در این آزمایش سه هدفی که در آزمایش قبل تعیین موقعیت مطلق شدند، به صورت شبیه‌سازی شده طی دو مرحله جابجا می‌شوند. در مرحله اول تمامی اهداف در هر سه راستا به میزان کمتر از $\lambda/4$ جابجا می‌شوند. مقدار جابجایی در راستای برد، آزیموت و زنیت متفاوت است و این مقادیر برای هر هدف نیز با اهداف دیگر متفاوت است. در مرحله دوم میزان جابجایی بیشتر از $\lambda/4$ در نظر گرفته شده است. علت انتخاب آستانه $\lambda/4$ بدین جهت است که نشان دهیم روش ارائه شده توانایی تعیین هر اندازه میزان جابجایی، بدون استفاده از الگوریتم‌های بازیابی فاز را دارد. شکل (۷) بردار جابجایی نسبی واقعی و تخمینی اهداف شبیه‌سازی شده را به صورت سه بعدی نشان می‌دهد. جابجایی‌ها نسبت به مکان اولیه اهداف (زمان ۱) که در آزمایش اول صورت گرفته است، در نظر گرفته شده‌اند. شکل (۷-الف) بردار جابجایی نسبی اهداف در مرحله اول (۷-ب) بردار جابجایی نسبی اهداف در مرحله دوم را که مقادیری در حدود چندین سانتی‌متر هستند را، نشان می‌دهد. به دلیل اینکه اندازه بردارها در شکل (۷-ب) بزرگ هستند و اختلاف آن‌ها به خوبی دیده نمی‌شود، کمترین



شکل ۷- بردار جابجایی واقعی و بردار جابجایی نسبی به صورت سه بعدی (الف) جابجایی مرحله اول - (ب) جابجایی مرحله دوم

جدول ۳- بردار جابجایی واقعی و تخمینی اهداف و میزان خطای آن‌ها برای هر سه هدف پس از جابجایی مرحله اول (واحد: میلی‌متر)

| مؤلفه مکانی | هدف اول | | | هدف دوم | | | هدف سوم | | |
|----------------|---------|-------|--------|---------|-------|-------|---------|-------|------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| جابجایی واقعی | ۰/۶ | ۰/۸ | -۰/۵ | -۰/۵ | ۰/۷ | ۰/۴ | ۰/۵ | ۰/۷ | -۰/۴ |
| جابجایی تخمینی | ۰/۵۹۳ | ۰/۷۹۷ | -۰/۶۲۹ | -۰/۴۴۳ | ۰/۷۵۲ | ۰/۵۰۳ | ۰/۴۹۴ | ۰/۷۰۲ | ۰/۶ |
| خطای جابجایی | ۰/۰۰۷ | ۰/۰۰۶ | ۰/۱۲۹ | ۰/۰۵۷ | ۰/۰۵۲ | ۰/۱۰۳ | ۰/۰۰۶ | ۰/۰۰۲ | ۰/۲ |
| RMSE | ۰/۰۷۴ | | | ۰/۰۷۴ | | | ۰/۱۱۵ | | |

جدول ۴- بردار جابجایی واقعی و تخمینی اهداف و میزان خطای آن‌ها برای هر سه هدف پس از جابجایی مرحله دوم (واحد: میلی‌متر)

| مؤلفه مکانی | هدف اول | | | هدف دوم | | | هدف سوم | | |
|----------------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|---------|--------|----------|
| | X | Y | Z | X | Y | Z | X | Y | Z |
| جابجایی واقعی | ۱۵ | ۲۰ | -۱۰ | -۸۰ | ۵۰ | ۴۰ | ۱۲۰ | ۹۰ | -۱۰۰ |
| جابجایی تخمینی | ۱۵/۵۱۱ | ۱۹/۹۹۶ | -۱۰/۰۷۲ | -۸۰/۳۵۴ | ۵۰/۰۶۱ | ۴۰/۵۴۸ | ۱۲۰/۰۳۲ | ۸۹/۹۰۸ | -۱۰۰/۸۸۷ |
| خطای جابجایی | ۰/۵۱۱ | ۰/۰۰۴ | ۰/۰۷۲ | ۰/۳۵۴ | ۰/۰۶۱ | ۰/۵۴۸ | ۰/۰۳۲ | ۰/۰۹۲ | ۰/۸۸۷ |
| RMSE | ۰/۲۹۸ | | | ۰/۳۷۸ | | | ۰/۵۱۵ | | |

گیرنده تعیین شد. سپس به دلیل حرکت سنجنده در یک صفحه دو بعدی و افزونگی مشاهدات زاویه، از معادلات سرشکنی کمترین مربعات برای تعیین موقعیت مطلق اهداف به صورت سه بعدی استفاده شد.

در این مقاله دو آزمایش مطرح شد که در آن‌ها سه هدف نقطه‌ای شبیه‌سازی شدند. یکی از آزمایش‌ها به بررسی دقت تعیین موقعیت مطلق و دیگری به بررسی دقت تعیین موقعیت نسبی پرداخت. در آزمایش اول بیشترین خطای موجود در حد ۳ میلی‌متر برای تعیین موقعیت مطلق سه بعدی بود. در این آزمایش تعیین موقعیت در راستای برد و آزیموت با دقت مناسبی انجام گردید اما بیشترین خطای ایجاد شد در تعیین موقعیت مؤلفه Z بود

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله به پیاده‌سازی و بررسی روشی جهت تعیین موقعیت مطلق و نسبی اهداف در یک سیستم راداری زمینی موج میلی‌متری از نوع ورودی - خروجی چندگانه پرداخته شد. بدین منظور ابتدا به شبیه‌سازی سنجنده زمینی و هندسه برداشت داده آن پرداخته شد. در ادامه با استفاده از رابطه سیگنال خام دریافتی، برای چند هدف نقطه‌ای شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار متلب فراهم گردید. پس از ایجاد سیگنال خام و دریافت آن توسط آنتن‌های گیرنده، با استفاده از اطلاعات فاز سیگنال دریافتی، زاویه برخورد رسیده از هدف نسبت به آنتن

جابجایی $1/8$ متر بود، دقت تعیین این بردار حدود $0/5$ میلی‌متر است. در این آزمایش هم بیشترین خطا مربوط به مولفه قائم است. نتایج حاصل از این مقاله نشان داد که بر خلاف سایر روش‌های مرسوم که از بازیابی فاز برای تعیین مقدار جابجایی‌های بزرگ‌تر از $\lambda/4$ و فقط به صورت یک یا دو بعدی استفاده می‌کنند، روش ارائه شده توانایی تعیین بردار جابجایی نسبی به صورت سه بعدی با دقت مناسب و بدون وابستگی به اندازه میزان جابجایی را دارد.

که از 1 تا 6 میلی‌متر متغیر بود. در آزمایش دوم، از همان اهداف شبیه‌سازی شده در مرحله اول استفاده اما جهت بررسی دقت تعیین بردار جابجایی نسبی، این اهداف طی دو مرحله و مقادیر بزرگی مختلف و در راستاهای متفاوت جابجا شدند. نتایج بررسی نشان داد که هر چه مقدار جابجایی کمتر باشد، دقت بردار جابجایی تخمینی نیز بهتر است. در بهترین حالت دقت بردار جابجایی نسبی کمتر از $0/1$ میلی‌متر بود و در بدترین حالت که اندازه بردار

مراجع

- [1] P. Kohut et al., "Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements," *Struct. Heal. Monit. An Int. J.*, vol. 12, no. 5–6, pp. 411–429, Sep. 2013.
- [2] D. González-Aguilera, J. Gómez-Lahoz, and J. Sánchez, "A New Approach for Structural Monitoring of Large Dams with a Three-Dimensional Laser Scanner," *Sensors*, vol. 8, no. 9, pp. 5866–5883, Sep. 2008.
- [3] S. B. Im, S. Hurlbaeus, and Y. J. Kang, "Summary Review of GPS Technology for Structural Health Monitoring," *J. Struct. Eng.*, vol. 139, no. 10, pp. 1653–1664, Oct. 2013.
- [4] P. A. Psimoulis and S. C. Stiros, "Measuring Deflections of a Short-Span Railway Bridge Using a Robotic Total Station," *J. Bridg. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 182–185, Feb. 2013.
- [5] J. W. Park, J. J. Lee, H. J. Jung, and H. Myung, "Vision-based displacement measurement method for high-rise building structures using partitioning approach," *NDT E Int.*, vol. 43, no. 7, pp. 642–647, Oct. 2010.
- [6] J. Park and C. Nguyen, "Development of a new millimeter-wave integrated-circuit sensor for surface and subsurface sensing," *IEEE Sens. J.*, vol. 6, no. 3, pp. 650–655, Jun. 2006.
- [7] K. Haddadi, M. M. Wang, D. Glay, and T. Lasri, "A 60 GHz six-port distance measurement system with sub-millimeter accuracy," *IEEE Microw. Wirel. Components Lett.*, vol. 19, no. 10, pp. 644–646, Oct. 2009.
- [8] C. Zhang, M. Kuhn, A. E. Fathy, and M. Mahfouz, "Real-time noncoherent UWB positioning radar with millimeter range accuracy in a 3D indoor environment," in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2009, pp. 1413–1416.
- [9] S. Bakhtiari et al., "Compact millimeter-wave sensor for remote monitoring of vital signs," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 61, no. 3, pp. 830–841, Mar. 2012.
- [10] M. Pieraccini, F. Parrini, M. Fratini, C. Atzeni, P. Spinelli, and M. Micheloni, "Static and dynamic testing of bridges through microwave interferometry," *NDT E Int.*, vol. 40, no. 3, pp. 208–214, Apr. 2007.
- [11] G. Luzi, M. Crosetto, and E. Fernández, "Radar Interferometry for Monitoring the Vibration Characteristics of Buildings and Civil Structures: Recent Case Studies in Spain," *Sensors*, vol. 17, no. 4, p. 669, Mar. 2017.
- [12] T. A. Stabile, A. Perrone, M. R. Gallipoli, R. Ditommaso, and F. C. Ponzio, "Dynamic survey of the Musmeci bridge by joint application of ground-based microwave radar interferometry and ambient noise standard spectral ratio techniques," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 870–874, Jul. 2013.
- [13] B. Zhang et al., "Dynamic displacement monitoring of long-span bridges with a microwave radar interferometer," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 138, pp. 252–264, Apr. 2018.
- [14] D. Dei, D. Mecatti, and M. Pieraccini, "Static testing of a bridge using an interferometric radar: The case study of 'ponte degli Alpini,' Belluno, Italy," *Sci. World J.*, vol. 2013, 2013.
- [15] A. Monti-Guarnieri, P. Falcone, D. d'Aria, and G. Giunta, "3D Vibration Estimation from Ground-Based Radar," *Remote Sens.*, vol. 10, no. 11, p. 1670, Oct. 2018.
- [16] Y. Deng, C. Hu, W. Tian, and Z. Zhao, "3-D Deformation Measurement Based on Three GB-MIMO Radar Systems: Experimental Verification and Accuracy Analysis," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, pp. 1–5, Aug. 2020.
- [17] M. Pieraccini, L. Miccinesi, and N. Rohjani, "A GBSAR Operating in Monostatic and Bistatic Modalities for Retrieving the Displacement Vector," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 14, no. 9, pp. 1494–1498, Sep. 2017.
- [18] L. Miccinesi and M. Pieraccini, "Monostatic/Bistatic Interferometric Radar for Monitoring Slender Structures," in *Proceedings - CAMA 2019: IEEE International Conference on Antenna Measurements and Applications*, 2019, pp. 12–15.
- [19] C. Li, W. Chen, G. Liu, R. Yan, H. Xu, and Y. Qi, "A Noncontact FMCW Radar Sensor for Displacement Measurement in Structural Health Monitoring," *Sensors*, vol. 15, no. 4, pp. 7412–7433, Mar. 2015.