

حداقل سازی خطای چندمسیری گیرنده ارزان قیمت GPS با استفاده از روش‌های ترکیبی PSO-SVM و GA-SVM

محمد شمس اسفندآبادی، محمدحسین رفان و عادل دمشقی

تعیین مکان (طول/عرض/ارتفاع) جغرافیایی حداقل نیاز به ۴ ماهواره است [۳]. دقت مکان‌یابی این سامانه تحت تأثیر خطاهای ناشی از یونسفر و تروپوسفر، خطاهای مداری و چندمسیری ... چندان بالا نیست [۴] و [۵]. یکی از خطاهایی که سامانه تفاضلی روی آن اثر ندارد و جزء خطای غیر وابسته و مختص به هر گیرنده به طور جداگانه می‌باشد، چندمسیری است [۶] و [۸]. سامانه GPS یک سامانه قابل انعطاف است که مکان دقیق را با نرخ بالا فراهم می‌کند. در میان عوامل خطای تأثیرگذار در سیگنال GPS چندمسیری یک خطای اساسی است [۹] و [۱۰]. چندمسیری وقتی که سیگنال GPS از ماهواره به آنتن از طرق مختلف می‌رسد اتفاق می‌افتد. دلیل این پدیده، انعکاس و پراکنش سیگنال در برخورد با عناصر جانبی مانند ساختمان، کوه و ... است. این خطا قابل توجه بوده و بر روی موقعیت‌یابی ایستا و پویا اثرگذار است [۱۱]. چندمسیری از یک گیرنده به گیرنده دیگر متفاوت است و دارای همبستگی نیست [۸]. اغلب روش‌های پردازش اطلاعات از اطلاعات خطای چندمسیری و یا خود اثر چندمسیری به عنوان سیگنال ورودی الگوریتم‌ها استفاده می‌کنند. اگر مدت زمان سپری شده بیش از یک کد باشد گیرنده بر اثر چندمسیری غلبه کرده و اثر کمی از این خطا بر عملکرد مکان‌یابی GPS به وجود خواهد آمد [۹] اما اگر این تأخیر اندک باشد اثر چندمسیری به شدت بر مکان‌یابی تأثیر خواهد داشت. روند محاسبه همبستگی بین سیگنال دریافت‌شده و مرجع تولیدشده در گیرنده تحت تأثیر سیگنال دریافتی که نسخه تحریف‌شده از سیگنال اصلی است، قرار دارد. سیگنال آسیب‌دیده موجب تخریب و خطا در مشاهدات کد و فاز و در نتیجه خطا در مکان‌یابی می‌شود [۱۰]. با توجه به نوع گیرنده اثر چندمسیری موجب خطا در محدوده متر برای مشاهدات کد و در محدوده سانتی‌متر برای مشاهدات فاز می‌گردد [۱۱]. در گیرنده، چندمسیری با ۴ مشخصه نمایان می‌گردد و تمام این مشخصات به سیگنال مستقیم ارتباط دارد (دامنه سیگنال بازگشتی نسبت به سیگنال مستقیم، طول تأخیر، فاز سیگنال بازگشتی نسبت به سیگنال مستقیم و نرخ فاز) [۱۲]. مدل‌سازی اثر چندمسیری و کاهش آن یک چالش بزرگ در کاربردهای GPS دقیق است [۱۳]. روش‌های گوناگونی شامل روش‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای کاهش این اثر به کار گرفته شده‌اند [۱۴] و روش‌های نرم‌افزاری در کاهش این اثر کارایی بهتری دارد. اثر چندمسیری هم در کاربردهای زمانی و هم در کاربردهای مکانی تأثیرگذار است هر چند این اثر فوایدی چون اندازه‌گیری عمق برف و رشد گیاهان را دارد. در این مقاله کاهش اثر چندمسیری مبتنی بر کد گیرنده‌ای ارزان قیمت بر اساس یک روش نرم‌افزاری مد نظر قرار گرفته و مدل چندمسیری بر اساس مدل SVM استخراج شده است. چندمسیری استخراج‌شده برای بهبود مشاهدات مکان‌یابی استفاده می‌شود. آزمایش‌ها برتری الگوریتم پیشنهادی در مقاله را نسبت به الگوریتم‌هایی که اخیراً برای این منظور استفاده شده‌اند نشان داد. برای تعیین پارامترهای اساسی SVM از GA و

چکیده: یکی از خطاهای بسیار تأثیرگذار بر مکان‌یابی دقیق GPS اثر چندمسیری مربوط به هر گیرنده است. چندمسیری، دریافت یک سیگنال توسط آنتن از بیش از یک مسیر است و این اثر یک منبع بزرگ خطای ناشناخته در مکان‌یابی است و با روش‌های تفاضلی حذف نمی‌شود. این اثر به طور گسترده‌ای وابسته به محیط‌های مختص هر گیرنده است و یک اثر فرکانس پایین است. هندسه بین ماهواره‌های GPS و مکان خاص هر گیرنده در روزهای نجومی تکرار می‌گردد و اثرات چندمسیری تمایل به رفتارهای مشابه در روزهای متوالی دارد. در این مقاله یک روش برای استخراج رفتار اثرات چندمسیری بر مشاهدات کد GPS اعمال شد و کاهش خطای چندمسیری موجب افزایش دقت مکان‌یابی می‌شود. در روش پیشنهادی، سیگنال مانده بر اساس تفاضل دوگانه (DD) تولید شده و به عنوان ورودی الگوریتم پیشنهادی استفاده می‌شود. برای تقریب و مدل‌سازی چندمسیری از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) استفاده شده است. برای تعیین پارامترهای اساسی SVM و تابع کرنل آن از دو الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات (PSO) و الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده شد. برای ارزیابی دقت روش پیشنهادی، شبیه‌سازی و آزمایشاتی بر اساس دو ایستگاه (مرجع و کاربر) و دو گیرنده ارزان قیمت طراحی شد، تست روش‌های پیشنهادی بر اساس داده واقعی انجام شد و آزمایشات نشان داد که خطای چندمسیری گیرنده ایستگاه کاربر بر اساس معیار RMS با این روش تا ۷۰ درصد در حالت تست ایستا کاهش داشته است. مدل‌های این مقاله با برخی مدل‌های اخیر ارائه‌شده در زمینه کاهش خطای چندمسیری مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته و از نتایج آن دقت بالا و پایداری نتایج در مکان‌یابی است. دقت مکان‌یابی سه‌بعدی پس از استفاده از روش پیشنهادی حدود ۵۶٪ بهبود داشته و به ۱/۶۰ متر رسیده است.

کلیدواژه: GPS، SVM، GA، PSO، چندمسیری.

۱- مقدمه

سامانه GPS، مکان‌یابی بر اساس صورت فلکی بیش از ۲۴ ماهواره است که علاوه بر مکان، سرعت و زمان دقیق را در اختیار کاربران قرار می‌دهد [۱]. ماهواره‌های این سامانه دور مدارات مشخص اطراف زمین می‌چرخند و سیگنال‌هایی را برای ایستگاه‌های زمینی ارسال می‌کنند [۲]. استفاده از سیستم‌های ماهواره‌ای موجب گردیده این سامانه با پایداری زیادی بدون مشکلات مکان‌یابی زمین پایه به سرویس‌دهی بپردازد. برای

این مقاله در تاریخ ۸ مهر ماه ۱۳۹۴ دریافت و در تاریخ ۳ آبان ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

محمد شمس اسفندآبادی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، (email: mshams@sru.ac.ir).

محمدحسین رفان، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، (email: refan@sru.ac.ir).

عادل دمشقی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهیدرجایی، تهران، (email: dameshghi.adel@sru.ac.ir).

کاهش چندمسیری ارائه شده است [۲۷] تا [۳۰]. استفاده از فیلترهای ذره‌ای در کنار الگوریتم‌های رایجی مانند فیلتر کالمن و فیلتر کالمن توسعه‌یافته از دیگر تلاش‌ها برای کاهش این پدیده مخرب سیگنال GPS است.

بسیاری از الگوریتم‌ها برای حل مسئله خطی به وجود آمده‌اند. برای تخمین و حل مسایل غیر خطی طرح‌های خطی‌سازی محلی راه حل‌های بهینه‌ای برای حل بسیاری مسایل از سیستم‌های غیر خطی هستند. در مسایلی که این مدل‌ها ناموفق هستند استفاده از مدل‌های جایگزین مانند فیلترهای ذره‌ای مناسب است [۳۱]. ترکیب سه روش شامل مدل موجک، مدل فیلتر کالمن و فیلتر ذره‌ای با نام فیلتر ذره‌ای ترکیبی از جمله کارهای جدید است [۳۲]. روش‌های متنوعی بر اساس ویولت مطرح شده که این روش‌ها بر اساس حذف نویز عمل می‌کنند. به منظور استخراج و کاهش خطای چندمسیری این مدل‌ها اطلاعات خطای DD را در نویز فرکانس پایین و نویز فرکانس بالا به عنوان ورودی دریافت کرده و سپس مدل‌سازی می‌کنند. اطلاعات خروجی مستقیماً به منظور افزایش دقت سامانه به مشاهدات GPS اعمال می‌گردد [۳۳].

تخمین‌زدن یکی از روش‌های کاربردی در حل مشکلات مسیریابی است. از جمله این کاربردها اندازه‌گیری و تخمین موقعیت وسیله در حال حرکت است. واضح است که حفظ امنیت وسیله‌ای مانند هواپیما در این است که این مسیریابی به صورت بلادرنگ و در نتیجه تخمین بلادرنگ باشد. این تحقیق برای گیرنده‌های دوفرکانسه و بر اساس مقایسه اندازه‌گیری فاز حامل با اندازه‌گیری حامل-منهای-کد است و از آنجایی که اثر چندمسیری قابل فرموله‌شدن است، بنابراین روشی برای تخمین چندمسیری بر اساس SVM ارائه گردیده است [۳۴]. اولین تحقیقات در حوزه کاهش چندمسیری به صورت نرم‌افزاری در سال ۱۹۹۸ با استفاده از ماهواره‌های ارتفاع بالا انجام شد. هرچند این روش‌ها خطای چندمسیری را حذف نمی‌کند اما آن را کاهش می‌دهد. در این روش‌ها DD به عنوان ورودی مدل است و از آن برای استخراج اثر چندمسیری استفاده می‌شود و در نتیجه مشاهدات GPS قابل بهبود است. یک برنامه مبتنی بر MATLAB/OCTAVE برای کاهش اثر چندمسیری در سال ۲۰۱۴ ارائه شده است [۳۵].

۳- اثر چندمسیری

با توجه به این که هدف مقاله کاهش اثر چندمسیری در گیرنده‌های ارزان‌قیمت GPS است، مشاهدات مورد مطالعه بر اساس شبه‌فاصله-کد می‌باشد. دریافت سیگنال منعکس‌شده با اجرام جانبی توسط ایستگاه مرجع این سامانه موجب افزایش زمان رسیدن سیگنال نسبت به حالت مستقیم می‌شود. ارتفاع و فاز سیگنال منعکس‌شده بستگی به خصوصیات سطح بازتابنده و هندسه بین ماهواره GPS، آنتن گیرنده و اجرام بازتابنده دارد. برای نشان‌دادن انتشار چندمسیری GPS فرض بر این است که سیگنال از یک سمت ورودی را دریافت می‌کند و از یک سمت خروجی مطابق با شکل ۱ بازتابیده می‌شود. چندمسیری بر اساس انحراف کد C/A یا کد P است، همانند انحرافی که در مشاهدات فاز حامل وجود دارد. فرکانس‌های فاز حاملی برای GPS وجود دارد از جمله L_1 به فرکانس ۱۵۷۵/۴۲ مگاهرتز، L_2 به فرکانس ۱۲۲۷/۶۰ مگاهرتز و L_5 به فرکانس ۱۱۷۶/۴۵ مگاهرتز. مدل ریاضی برای اندازه‌گیری فاز و کد حامل ارائه می‌شود [۳۰]. مشاهدات ماهواره بر اساس اندازه‌گیری کد و همچنین مشاهدات فاز به صورت (۱) و (۲) است [۳۲] و [۳۶]

PSO استفاده شده است. استفاده از این روش‌ها با فرض خصوصیات محیطی ماندگار و غیر قابل تغییر برای نمونه‌برداری است. اثرات چندمسیری GPS به صورت یک سری زمانی نوشته می‌شود. این اثر به صورت یک تابع مکرر و بر اساس رابطه هندسی ماهواره نسبت یک گیرنده ثابت در دو روز متوالی قابل مدل‌سازی است. بنابراین اثر چندمسیری به صورت یک مسئله رگرسیونی قابل نگاشت است. در ابتدا یک ایستگاه مرجع برای نمونه‌برداری تعیین شد و با استفاده از یک گیرنده ارزان‌قیمت نمونه‌برداری اطلاعات انجام شد. اطلاعات در ۵ روز متوالی جمع‌آوری گردید و سپس بر اساس ساختار مشخص اطلاعات چندمسیری تولید و از آن به عنوان ورودی الگوریتم‌ها استفاده شد. اطلاعات پس از پیش‌پردازش، آماده و به عنوان ورودی به الگوریتم داده می‌شوند. برای بهبود کارایی مدل SVM از دو الگوریتم GA و PSO برای تعیین پارامترهای اساسی SVM استفاده شد و سپس کارایی این روش‌ها با سایر روش‌های کاهش اثر چندمسیری مبتنی بر کد مقایسه شد.

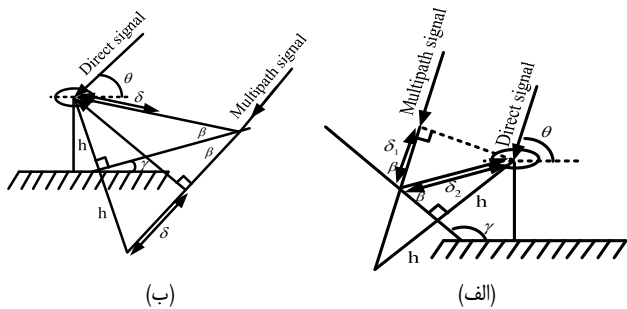
ساختار مقاله به این شرح است: بخش دوم مقاله مروری بر کارهای در گذشته انجام شده در کاهش اثر چندمسیری است. بخش سوم به اثر چندمسیری شبه‌فاصله-کد می‌پردازد. بخش چهارم SVM است و در همین بخش روش‌های ترکیبی PSOSVM و GASVM تشریح می‌گردد. شیوه جمع‌آوری اطلاعات بخش پنجم است. شبیه‌سازی، تحلیل و سنجش روش‌ها در بخش ششم انجام می‌شود و نهایتاً بخش هفتم نتیجه‌گیری مقاله است.

۲- روش‌های کاهش چندمسیری

روش‌های گوناگونی برای کاهش خطای چندمسیری گیرنده به کار گرفته شده که در چهار دسته کلی شامل طراحی آنتن مناسب و تعیین مکان مناسب برای آن، بهبود ساختاری و سخت‌افزار داخلی گیرنده‌های GPS، پس‌پردازش و نهایتاً راهکارهای پردازش سیگنالی است. روش‌های مبتنی بر آنتن شامل آنتن‌های حلقوی [۱۵] و آنتن‌های مضاعف [۱۶] مثال‌هایی در این زمینه هستند.

برخی از روش‌های کاهش اثر چندمسیری بر اساس سخت‌افزار هستند [۱۷] و [۱۸]. روش‌های مبتنی بر سخت‌افزار به دو دسته روش‌های مبتنی بر گیرنده و آنتن تقسیم می‌شوند. در این زمینه محققان در حوزه پردازش سیگنال گیرنده تکنولوژی کاهش چندمسیری را پیاده‌سازی کردند و تخمین چندمسیری با استفاده DLP که روی گیرنده‌های مدرن GPS پیاده‌سازی شد. این موارد سخت‌افزاری کاملاً اثر چندمسیری را حذف نمی‌کنند [۱۷] و [۱۸].

روش MEDLL برای تخمین سیگنال چندمسیری مبتنی بر کد و فاز ایجاد شد [۱۸]. روش الگوریتم MUSIC بر اساس دسته‌بندی سیگنال چندمسیری ارائه شد [۱۹]. روش‌های پردازش اطلاعاتی اخیراً در حوزه فرکانس و زمان در این مقوله مورد استفاده قرار می‌گیرند. اعمال روش‌های کاهش چندمسیری، خطای مبتنی بر کد را در حد سانتی‌متر کاهش می‌دهد. در مراجع مختلف حذف این خطا با روش فیلترهای تطبیقی انجام گردیده، یک فیلتر تطبیقی به منظور شناسایی و حذف چندمسیری GPS در [۷] مطرح شده و تعیین سائز گام فیلتر در طراحی بهینه آن تأثیرگذار است [۷] و [۲۰] تا [۲۲]. روش‌هایی با محدوده فرکانسی بر اساس تحلیل طیفی چندمسیری سیگنال GPS و عمدتاً با استفاده از روش FFT و پردازش تبدیل موجک مطرح شده‌اند [۲۳] و [۲۴]. روش مبتنی بر شبکه عصبی نیز در این زمینه استفاده شده است [۲۵] و [۲۶]. طرح‌هایی بر اساس اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نویز برای



شکل ۲: انعکاس چندمسیری، (الف) رو به جلو و (ب) رو به عقب.

$$\delta = r h \sin \beta \quad (۴)$$

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} r h \sin \beta \quad (۵)$$

علاوه بر این، قوانین زیر به ترتیب در شکل های ۲-الف و ۲-ب با فرض این که زاویه اندازه گیری شده در بازه ۰ تا ۱۸۰ درجه و در جهت ساعت گرد باشد برقرار است

$$\beta + \gamma = \theta \quad (۶)$$

$$\beta + \theta = \gamma \quad (۷)$$

این دو قانون مطابق با (۸) بازنویسی می شود

$$\beta = |\theta - \gamma| \quad (۸)$$

با ترکیب (۴) تا (۶) در (۳)، فرمول چندمسیری مبتنی بر کد مطابق با یک سیگنال منعکس شده مطابق با رابطه زیر بازنویسی می شود

$$M^p = \frac{\alpha r h \sin |\theta - \gamma| \cos \frac{4\pi h}{\lambda} \sin |\theta - \gamma|}{1 + \alpha \cos \frac{4\pi h}{\lambda} \sin |\theta - \gamma|} \quad (۹)$$

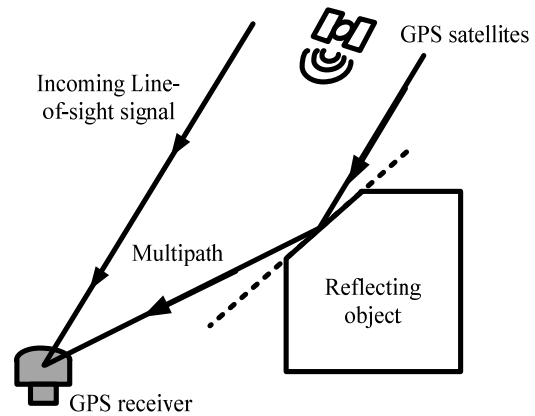
به طور کلی m سیگنال منعکس شده وجود دارد و کل کد چندمسیری مجموع هر کد چندمسیری به تنهایی است

$$M^p = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha r h \sin |\theta - \gamma| \cos \frac{4\pi h}{\lambda} \sin |\theta - \gamma|}{1 + \sum_{i=1}^m \alpha \cos \frac{4\pi h}{\lambda} \sin |\theta - \gamma|} \quad (۱۰)$$

با فرض این که محیط چندمسیری ثابت است، مقادیر α_i ، h_i و γ_i ثابت هستند [۳۴] و [۳۷].

۴- روش های تقریب چندمسیری مبتنی بر ماشین بردار پشتیبان

برای تقریب چندمسیری از دو مدل PSO-SVM و GA-SVM استفاده می گردد و تقریب توسط الگوریتم SVM انجام می شود. دو الگوریتم PSO و GA برای تعیین پارامترهای اساسی SVM و کرنل SVM استفاده می شود. روش SVM یک مدل قوی برای بسیاری از کاربردهای تقریب است. در این الگوریتم از اصول کمینه سازی ریسک ساختاری استفاده شده در حالی که سایر روش ها از اصول کمینه سازی ریسک تجربی بهره می برند. ریسک ساختاری عملکرد بهتری نسبت به ریسک تجربی دارد [۱] و [۲]. تنظیم پارامترهای SVM در روند آموزش SVM و دقت تقریب آن تأثیرگذار است. به منظور اطمینان از عملکرد SVM، PSO و GA برای تعیین پارامترهای SVM به کار گرفته شده اند.



شکل ۱: اثر چندمسیری.

$$P_i = r + c(\delta_u - \delta_s) + I_i + T + M_i^p + \varepsilon_i^p \quad (۱)$$

$$\phi_i \lambda_i = r + c(\delta_u - \delta_s) - I_i + T + M_i^p + \varepsilon_i^p \quad (۲)$$

جایی که r رنج صحیح بین یک ماهواره و یک گیرنده، c سرعت نور و δ_u و δ_s به ترتیب بایاس ساعت ماهواره و گیرنده است. T تأخیر تروپوسفریک، I تأخیر یونسفریک، λ طول موج و عدد ابهام N است. نشانه های M_i^p و ε_i^p خطای چندمسیری کد و نویز گیرنده تصادفی هستند، در حالی که M_i^p و ε_i^p همین فاکتورها برای اندازه گیری فاز هستند. فاکتور I در هر دو رابطه نشان دهنده یونسفریک کد و فاز هست با این تفاوت که دارای علامت عکس یکدیگر می باشند. در حالت ایده آل در یک محیط چندمسیری - آزاد فقط یک مسیر سیگنالی از هر ماهواره به سمت آنتن GPS وجود دارد. در حقیقت هیچ محیط چندمسیری - آزادی وجود ندارد.

آنتن های گیرنده سیگنال را از مسیرهای گوناگونی و بیش از یک مسیر مستقیم دریافت می کنند. در نتیجه، گیرنده سیگنال مرکب متشکل از ترکیب سیگنال در جهت مستقیم و چندمسیری را دریافت می کند. به طور واضح و روشن، یک نمونه ساده شده از سیگنال چندمسیری را باید در نظر بگیریم. A_m و A_d نشان دهنده سیگنال مستقیم و چندمسیری، δ تأخیر مسیر و Ψ فاز نسبی چندمسیری بر حسب رادیان است. نسبت ارتفاع سیگنال چندمسیری به سیگنال مستقیم برابر با $\alpha = A_m/A_d \leq 1$ است و از طرفی θ و μ ارتفاع^۱ و زاویه^۲ ماهواره می باشد. مکان هر شیء بازتابنده به عنوان سطح دووجهی نسبت به سطح محلی است که دارای کجی با زاویه γ در فاصله h از مرکز آنتن است. β نشان دهنده زاویه بازتابنده شده نسبت به سطح بازتابنده است. خطای چندمسیری کد مطابق با (۳) نشان داده می شود

$$M^p = \frac{\alpha \delta \cos \psi}{1 + \alpha \cos \psi} \quad (۳)$$

برای حصول به مدل هندسی به ارتباط خطای چندمسیری با پارامترهای هندسی شامل زاویه و ارتفاع نیاز است. فرض بر این است که ماهواره، آنتن و بردار نرمال نسبت به سطح بازتابنده همگی در یک سطح مشترک هستند. انعکاس چندمسیری به دو دسته تقسیم می شود: پراکنش - جلو و پراکنش - عقب. در هر دو سناریو آن به آسانی مطابق با (۴) و (۵) به دست می آید

1. Elevation
2. Azimuth

$$\sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad (17)$$

$$0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq c, \quad i = 1, \dots, l$$

مسئله بهینه‌سازی فوق به کمک روش‌های QP قابل حل می‌باشد، در نتیجه رسیدن به اکستریم کلی نیز قطعی خواهد بود و خطر به دام افتادن در اکستریم محلی وجود ندارد. با حل (۱۶) و با استفاده از محدودیت‌های (۱۷) می‌توان ضرایب لاگرانژ α_i, α_i^* را تعیین کرد

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) x_i \quad \text{and} \quad \bar{b} = \frac{1}{\nu} (\bar{w}, (x_r + x_s)) \quad (18)$$

با توجه به شرایط KKT در معادله خواهیم داشت

$$\alpha_i \alpha_i^* = 0, \quad i = 1, \dots, l \quad (19)$$

بنابراین بردارهای پشتیبان نقاطی هستند که در آن دقیقاً یکی از ضرایب لاگرانژ بزرگ‌تر از صفر است (در مرز) که به معنی برآورده کردن شرط KKT است. نقاط آموزشی با ضرایب لاگرانژ غیر صفر بردار پشتیبان نامیده می‌شوند. وقتی که $\varepsilon = 0$ صفر است در (۲۰) داریم

$$\min \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \beta_i \beta_j (x_i, x_j) - \sum_{i=1}^l \beta_i y_i \quad (20)$$

با محدودیت (۲۱) تابع رگرسیون مطابق با (۱۱) است که در آن \bar{w} مطابق با (۲۲) است

$$\sum_{i=1}^l \beta_i = 0 - c \leq \beta_i \leq c, \quad i = 1, \dots, l \quad (21)$$

$$\bar{w} = \sum_{i=1}^l \beta_i x_i \quad \text{and} \quad \bar{b} = -\frac{1}{\nu} (\bar{w}, (x_r + x_s)) \quad (22)$$

یک نگاهت غیر خطی برای ترسیم داده‌ها در فضای با ابعاد زیاد که در آن رگرسیون خطی انجام می‌شود، صورت می‌گیرد. SVR غیر خطی از تابع تلفات استفاده می‌کند

$$\max w(\alpha, \alpha^*) = \max \sum_{i=1}^l \alpha_i^* (y_i + \varepsilon) - \alpha_i (y_i - \varepsilon) - \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (\alpha_i^* - \alpha_i) (\alpha_j^* - \alpha_j) K(x_i, x_j) \quad (23)$$

$$0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq c, \quad i = 1, \dots, l, \quad \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad (24)$$

حل (۲۳) با ثابت‌های (۲۴) ضرایب لاگرانژ α^*, α را برای تابع رگرسیون مشخص می‌کند. با فرض تابع رگرسیون به صورت (۲۵)

$$f(x) = \sum_{SFS} (\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_i^*) K(x_i, x_j) + b \quad (25)$$

در (۲۵) داریم

$$(\bar{w}, x) = \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_i^*) K(x_i, x_j) \quad (26)$$

$$\bar{b} = -\frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^l (\bar{\alpha}_i - \bar{\alpha}_i^*) (K(x_i, x_r) + K(x_i, x_s)) \quad (27)$$

در (۲۳) تابع کرنل تابع $K(x_i, x_j) = (\varphi(\bar{x}_i), \varphi(\bar{x}_j))$ است. توابع کرنل به SVM در رسیدن به کمینه محلی کمک می‌کنند. انواع مختلفی از توابع کرنل وجود دارد و با توجه به فواید RBF مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]

عملکرد واقعی مدل SVM به تعیین پارامترهای اساسی آن وابسته است. الگوریتم‌های که برای تعیین این پارامترها استفاده می‌شوند باید سریع و خودکار باشند. مدل‌های PSO-SVM و GA-SVM با SVM که پارامترهای آن با شیوه جستجوی هدایت‌شده (هدفمند) تعیین می‌گردد مقایسه می‌شوند [۱]، [۲] و [۴].

در SVM ایده اصلی در حل مسئله تقریب، ترسیم اطلاعاتی ورودی X در فضای چندبعدی F با یک رابطه غیر خطی φ و تقریب خطی در این فضا مطابق با رابطه زیر است [۱]

$$f(\bar{x}) = \langle w, \varphi(\bar{x}) \rangle > b \quad \text{with} \quad \varphi: R^n \rightarrow F, w \in F \quad (11)$$

که در (۱۱) $f(\bar{x})$ تابع خروجی، w بردار وزن، x بردار خروجی و b بایاس است. بنابراین تقریب خطی در فضای چندبعدی F با تقریب غیر خطی در فضای با ابعاد کم ورودی R^n مطابقت دارد. از آنجا که φ ثابت است، بنابراین w با استفاده از نمونه‌های محدود تجربی $R_{emp}[f]$ حداقل می‌گردد. در این فرایند مجموع ریسک

$$R_{reg}[f] = R_{reg}[f] + \lambda \|w^*\|^2 = \sum_{i=1}^l L(y_i, f(\bar{x}_i, w)) + \lambda \|w^*\|^2 \quad (12)$$

در (۱۲) l تعداد نمونه و L و λ ضریب تنظیم است. L تابع تلفات است. تابع تلفات مطابق با (۱۳) زیر محاسبه می‌گردد

$$L(y_i, f(\bar{x}_i, w)) = \begin{cases} 0, & \text{for } |f(x) - y| < \varepsilon \\ |f(x) - y| - \varepsilon, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

نرمال شده تابع (۱۲) به عنوان یک تابع درجه ۲ مطابق با (۱۴) است

$$\varphi = (w, \theta) = \frac{1}{\nu} |w|^2 + c \sum (\xi_i^- + \xi_i^+) \quad (14)$$

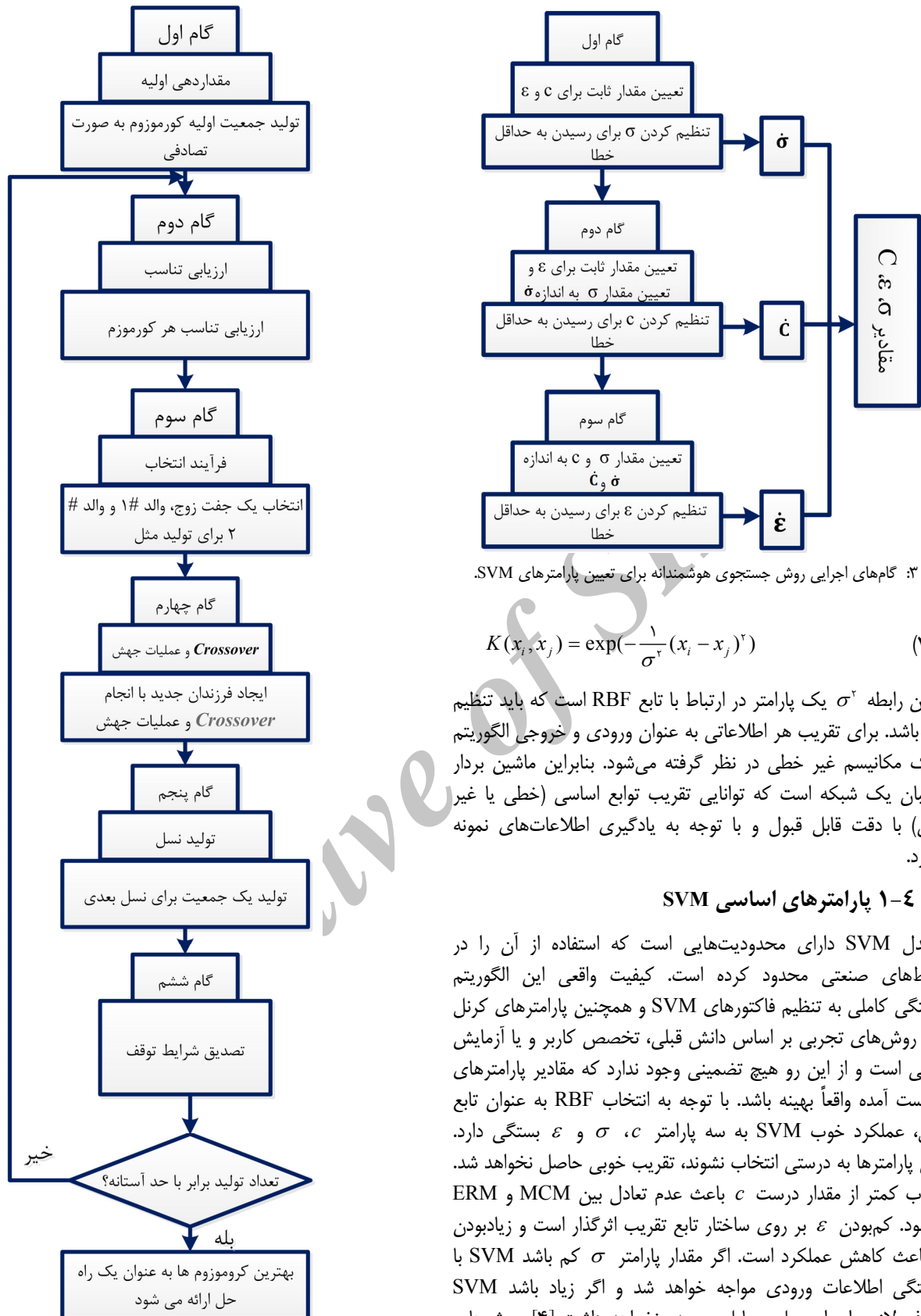
رابطه (۱۴) وابسته به محدودیت‌های (۱۵) است

$$\begin{cases} y_i - (w, \varphi(\bar{x}_i)) - b \leq \varepsilon + \xi_i^- \\ (w, \varphi(\bar{x}_i)) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^+ \\ \xi_i^-, \xi_i^+ \geq 0 \end{cases} \quad (15)$$

در محدودیت‌های (۱۵) c یک مقدار از پیش تعیین شده و ξ_i^+ و ξ_i^- متغیرهایی برای محدودیت‌های بالا و پایین خروجی الگوریتم SVM هستند. بخش اول تابع هزینه، فرایند کاهش وزن است که برای تنظیم سایز وزن‌ها و جریمه وزن‌های بزرگ صورت می‌گیرد. وظیفه این تنظیم، همگرایی این وزن‌ها به وزن‌های کوچک‌تر است. بخش دوم تابع جریمه است، اگر در نقاط آموزشی خطاها بزرگ‌تر از $\pm \varepsilon$ باشند با استفاده از تابع تلفات (L) تعدیل و جریمه می‌شوند. بخش سوم معادله، ثابت‌هایی هستند که مقادیر خطای بین تابع تقریب $f(x)$ و واقعی y_i را تنظیم می‌کند. معادله به صورت زیر است

$$\max w(\alpha, \alpha^*) = \max - \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) (\varphi(x_i), \varphi(x_j)) + \sum_{i=1}^l \alpha_i (y_i - \varepsilon) - \alpha_i^* (y_i + \varepsilon) \quad (16)$$

با محدودیت‌های زیر



شکل ۳: گام های اجرایی روش جستجوی هوشمندانه برای تعیین پارامترهای SVM.

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{1}{\sigma^2}(x_i - x_j)^T(x_i - x_j)\right) \quad (28)$$

در این رابطه σ^2 یک پارامتر در ارتباط با تابع RBF است که باید تنظیم شده باشد. برای تقریب هر اطلاعاتی به عنوان ورودی و خروجی الگوریتم با یک مکانیسم غیر خطی در نظر گرفته می شود. بنابراین ماشین بردار پشتیبان یک شبکه است که توانایی تقریب توابع اساسی (خطی یا غیر خطی) با دقت قابل قبول و با توجه به یادگیری اطلاعات های نمونه را دارد.

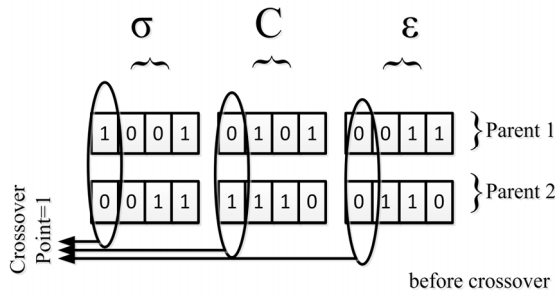
۴-۱ پارامترهای اساسی SVM

مدل SVM دارای محدودیت هایی است که استفاده از آن را در محیط های صنعتی محدود کرده است. کیفیت واقعی این الگوریتم وابستگی کاملی به تنظیم فاکتورهای SVM و همچنین پارامترهای کرنل دارد. روش های تجربی بر اساس دانش قبلی، تخصص کاربر و یا آزمایش تجربی است و از این رو هیچ تضمینی وجود ندارد که مقادیر پارامترهای به دست آمده واقعاً بهینه باشد. با توجه به انتخاب RBF به عنوان تابع کرنل، عملکرد خوب SVM به سه پارامتر C ، σ و ϵ بستگی دارد. وقتی پارامترها به درستی انتخاب نشوند، تقریب خوبی حاصل نخواهد شد. انتخاب کمتر از مقدار درست C باعث عدم تعادل بین MCM و ERM می شود. کم بودن ϵ بر روی ساختار تابع تقریب اثرگذار است و زیاد بودن آن باعث کاهش عملکرد است. اگر مقدار پارامتر σ کم باشد SVM با انباشتگی اطلاعات ورودی مواجه خواهد شد و اگر زیاد باشد SVM انعطاف لازم را برای حل مسایل پیچیده نخواهد داشت [۴]. روش های مختلفی برای تعیین این پارامترها وجود دارد از جمله روش جستجوی هدایت شده که به صورت گام های نشان داده شده در شکل ۳ است. این روش قابلیت اطمینان لازم را ندارد و تضمینی وجود ندارد مقادیر به دست آمده دقیقاً بهینه و بهترین هستند. از طرف دیگر زمان لازم برای تعیین پارامترها زیاد است، این روش غیر خودکار است. برای انتخاب پارامترهای اساسی SVM در این مقاله از GA و PSO استفاده شده است.

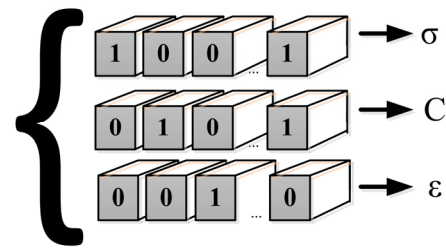
شکل ۴: الگوریتم ژنتیک [۱].

۴-۲ ماشین بردار پشتیبان و الگوریتم ژنتیک

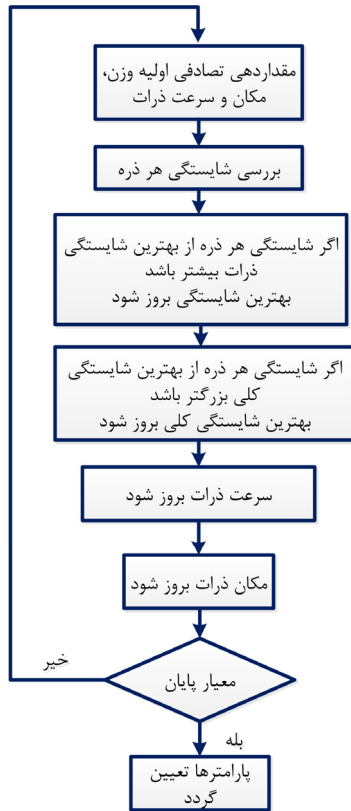
یکی از روش هایی که برای تعیین این پارامترها پیشنهاد می گردد GA است [۱] تا [۴]. گام های اساسی الگوریتم ژنتیک در شکل ۴ نشان داده شده است. تابع شایستگی مربوط با رابطه زیر محاسبه می شود



شکل ۶: فرایند ژنتیکی تعیین پارامترهای اساسی SVM.



شکل ۵: نگاشت ژن گونه پارامترهای اساسی SVM.



شکل ۸: الگوریتم PSO [۴].

تقریب زمان گیر است برای این سه پارامتر نیاز به حد مرزهایی است. کل داده‌های واقعی به دو دسته داده‌های آموزشی و داده‌های آزمایشی، تقسیم و داده‌های آموزش برای جستجوی ترکیباتی از سه پارامتر استفاده می‌شود. داده‌های آزمایش برای انتخاب مناسب‌ترین پارامترها بر اساس معیار RMSE است. مطابق با ساختار شکل ۷ GA-SVM برای تعیین سه پارامتر C ، σ و ϵ استفاده می‌شود.

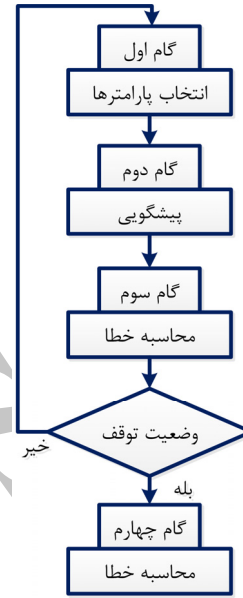
۳-۴ ماشین بردار پشتیبان و بهینه‌سازی گروهی ذرات

روش PSO در شکل ۸ نشان داده شده است. در روش بهینه‌سازی گروه ذرات برای هر ذره i ، یک موقعیت y_i و یک سرعت v_i در نظر گرفته می‌شود. اگر بعد مسئله بهینه‌سازی n فرض شود، بردار موقعیت و بردار سرعت i به صورت زیر است

$$y_i = [y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im}] \quad (31)$$

$$V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im}] \quad (32)$$

که در آن v_{id} و y_{id} به ترتیب معرف موقعیت مکانی و سرعت بعد d ام ذره i است. سرعت و موقعیت این بعد ذره در تکرار $t+1$ به صورت (۳۳) و (۳۴) است



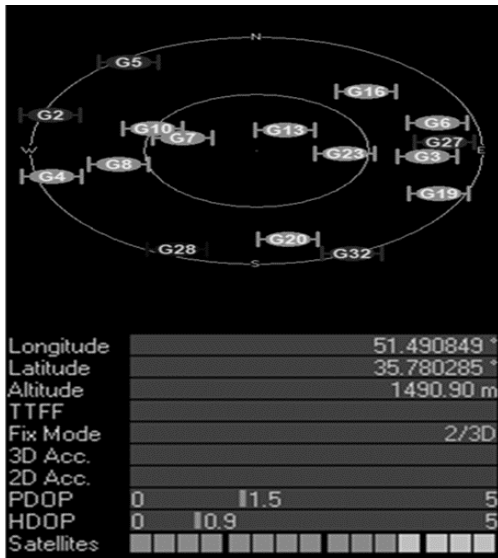
شکل ۷: ساختار GA-SVM [۱].

$$FF = -\frac{1}{\sigma^2 N} \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2 \quad (29)$$

در (۲۹) پارامتر σ طبق (۳۰) به دست می‌آید

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d}_i)^2} \quad (30)$$

که y_i مقادیر تقریب شده، d_i مقادیر واقعی، \bar{d}_i میانگین مقادیر واقعی و N حداکثر تعداد نمونه‌های تست است. سه پارامتر آزاد σ ، C و ϵ توسط یک کروموزوم که متشکل از سه ژن به صورت اعداد دودویی می‌باشد در شکل ۵ نشان داده شده است. اندازه جمعیت در اینجا در حدود ۲۰۰ تنظیم شده که هر ژن شامل ۴۰ بیت است. اگر هر ژن شامل ۴۰ بیت باشد پس هر کروموزوم شامل ۱۲۰ بیت است و والدین با استفاده از دو کروموزوم از کل جمعیت بر طبق تابع تناسب انتخاب می‌شوند. برای انتخاب کروموزوم در تولید مثل از انتخاب چرخ رولت استفاده می‌شود. در این عملیات کروموزوم‌ها به صورت تصادفی جفت می‌شوند و برخی از زوج کروموزوم‌ها در بین دو نقطه شکست تعیین شده جابه‌جا می‌شوند. برای سادگی فرض کنید که یک ژن دارای چهار بیت است، پس یک کروموزوم شامل ۱۲ بیت می‌باشد (شکل ۶). قبل از انجام آمیزش مقادیر سه پارامتر در والدین اول ۱/۱۲۵، ۳/۱۲۵ و ۰/۹۳۷۵ و برای والدین دوم نیز سه مقدار ۰/۳۷۵، ۸/۷۵ و ۰/۱۸۷۵ است و پس از آمیزش مقادیر برای فرزندان اول سه مقدار ۱/۳۷۵، ۳/۷۵ و ۰/۱۸۷۵ و برای فرزندان دوم سه مقدار ۰/۱۲۵، ۸/۱۲۵ و ۰/۹۳۷۵ هستند. جهش به طور تصادفی با تبدیل بیت صفر به یک و یا بیت یک به صفر انجام می‌شود. نرخ آمیزش و جهش به صورت احتمالی تعیین می‌شود. به علت این که محاسبه خطاهای



شکل ۱۰: نمایی از ماهواره های ایستگاه مرجع.

۵- جمع آوری اطلاعات

در این آزمایش دو گیرنده ارزان قیمت به نام ایستگاه مرجع و ایستگاه کاربر در نظر گرفته شدند. شکل ۹ ساختار قرارگیری این دو ایستگاه را نشان می دهد. ایستگاه مرجع در فضای باز قرار گرفته و به عبارت دیگر تحت تأثیر اشکالات انتقالات سیگنال قرار نمی گیرد و ماهواره ها به خوبی در این ایستگاه دیده می شود، اثر چندمسیری در آن کم و نزدیک به صفر است. اطلاعات برای ارزیابی با نرخ فرکانسی ۱ Hz در ایستگاه ها با استفاده از گیرنده GPS مدل U-Blox LEA ۶H جمع آوری گردید. محل قرارگیری آنتن کاربر در کنار دانشکده مهندسی برق دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی در نظر گرفته شد. بالطبع به دلیل ساختمان های کناری این گیرنده تحت تأثیر چندمسیری است. مکان دقیق قرارگیری آنتن GPS ایستگاه مرجع به مختصات $x = 3225995.29$ ، $y = 4054636.8$ و $z = 3709429.64$ در سیستم ECEF است. مکان دقیق ایستگاه کاربر \bar{P}_i است

$$\bar{P}_i = (x_p = 3226206.69, y_p = 4054570.45, z_p = 3709308.96)$$

اطلاعات جمع آوری شده برای ۵ روز متوالی به تاریخ ۱۰ تیر تا ۱۴ تیر ۱۳۹۴ می باشد. این ساختار طراحی شده در واقع سامانه GPS ديفرانسیلی است که در آن اثر چندمسیری به دلیل وابستگی به محیط قابل کاهش نیست. تعداد ماهواره های قابل مشاهده توسط این گیرنده در بهترین حالت ۱۶ ماهواره است. در شکل ۱۰ نمایی از ماهواره های ایستگاه مرجع دیده می شود. با توجه به این که هدف اصلی مقاله تست موقعیت یابی پس از کاهش اثر چندمسیری است ماهواره های مشترک آن با ایستگاه کاربر به تعداد ۵ ماهواره به شماره ۷، ۸، ۱۰، ۱۳ و ۲۳ انتخاب شد و از همین ماهواره ها برای تست اثر الگوریتم ها و سپس تست موقعیت یابی استفاده شد.

ساختارهای مختلفی برای جمع آوری اطلاعات وجود دارد. اگر گیرنده مورد استفاده دوفرکانسه بود اطلاعات کد-منهای-حامل قابل استفاده بود، با تقاض (۱) و (۲) اطلاعات چندمسیری با توجه مقادیر قابل محاسبه و اندازه گیری سایر پارامترهای حاصل قابل محاسبه بود. در خصوص گیرنده های تکفرکانسه مبتنی بر کد باید از اطلاعات جفت-تفاضل



شکل ۹: نمونه برداری، (الف) ایستگاه کاربر و (ب) ایستگاه مرجع.

$$v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_i \cdot \text{rand}(P_{id}(t)) + c_r \cdot \text{rand}(\hat{P}_d(t) - y_{id} - y_{id}(t)) \quad (33)$$

$$y_{id}(t+1) = y_{id}(t) + v_{id}(t+1) \quad (34)$$

در روابط فوق، w وزن اینرسی در بازه $[0, 1]$ است

$$w(k) = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \cdot k \quad (35)$$

در این رابطه w_{\max} وزن اولیه، w_{\min} وزن نهایی، k_{\max} حداکثر تعداد تکرارها، k تعداد تکرار جاری و C_r و C_p ضرایب یادگیری یا شتاب در بازه $[1, 2]$ هستند. C_p را پارامتر اجتماعی و C_r را پارامتر شناختی می گویند و معمولاً این دو با هم برابر هستند. Rand عدد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه $[0, 1]$ ، \hat{P}_d بهترین موقعیت کلی در بین کل ذره ها برای بعد d ام تا کنون و P_{id} بهترین موقعیت محلی ذره در بین کل ذره ها برای بعد d ام تا به حال است. w برای ایجاد توازن لازم بین یافتن پاسخ کلی و محلی در رابطه بالا وارد شده است. ثابت شده که شرط همگرایی الگوریتم آن است که (۳۶) برقرار باشد

$$-1 < w < 1 - \frac{\Phi_p + \Phi_r}{2} \quad (36)$$

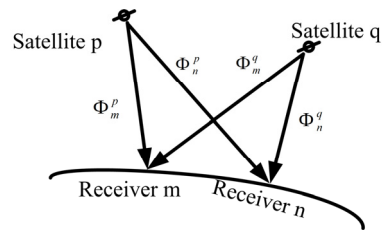
که در آن $\Phi_p = C_p \cdot \text{rand}$ و $\Phi_r = C_r \cdot \text{rand}$ هستند. برای جلوگیری از واگرایی الگوریتم، معمولاً مقدار نهایی سرعت هر ذره به یک مقدار بیشینه محدود می شود. شرط خاتمه الگوریتم همگرایی آن یا توقف بعد از تعداد معینی تکرار است. شایستگی هر ذره با استفاده از تابع برازندگی $f(0)$ سنجیده می شود. این تابع برازندگی مربوط به مسأله مورد نظر بوده و هدف کمینه کردن آن است. بهترین موقعیت هر ذره i ام در هر تکرار طبق (۳۷) به هنگام می شود

$$P_i(t) = \begin{cases} P_i(t-1) & \text{if } f(y_i(t)) \geq f(P_i(t-1)) \\ y_i(t) & \text{if } f(y_i(t)) < f(P_i(t-1)) \end{cases} \quad (37)$$

این رابطه به این معنا است که اگر مقدار فعلی تابع برازندگی ذره i ام به ازای موقعیت فعلی y_i از برانزده ترین مقدار قبلی آن کمتر باشد، همین موقعیت به عنوان بهترین موقعیت این ذره ثبت می شود و در غیر این صورت بهترین موقعیت ذره بهترین موقعیت قبلی باقی خواهد ماند. گام های الگوریتم PSO به صورت شکل ۸ است [۱]، [۲] و [۴]. ضرایب C_p و C_r به ترتیب ۲ و ۲ تعیین گردید و وزن اینرسی w به طور خطی بین ۰/۹ تا ۰/۵ کاهش پیدا کرد و حداکثر تعداد نمونه ها ۲۰۰ انتخاب شد. با استفاده از PSO مقادیر C ، σ و ε به ترتیب برابر با ۱/۰/۸، ۱/۳ و ۰/۶ تعیین گردید که این مقدار بهترین حالت برای خطای کم الگوریتم تقریب است.

جدول ۲: همبستگی نرمال شده اطلاعات اثر چندمسیری در چند روز.

روزها	تیر ۱۲	تیر ۱۳	تیر ۱۴	تیر ۱۵
تیر ۱۲	-	۰٫۹۸۱	۰٫۷۸۷	۰٫۵۶۵
تیر ۱۳	۰٫۸۵۸	-	۰٫۹۶۱	۰٫۴۹۸
تیر ۱۴	۰٫۷۸۹	۰٫۸۰۱	-	۰٫۹۲۰
تیر ۱۵	۰٫۵۹۹	۰٫۶۳۳	۰٫۷۹۹	-



شکل ۱۱: مشاهدات GPS جفت-تفاضلی و ارتباط هندسی ماهواره و گیرنده.

جدول ۱: ۱۰۰۰ نمونه EA برای ۵ ماهواره قابل دید مشترک دو ایستگاه.

شماره ماهواره	EA
۷	۵۶
۸	۳۷
۱۰	۴۳
۱۳	۷۸
۲۳	۶۳

(۳) فرض بر این است که آنتن‌ها ثابت هستند (مشابه شکل ۹). با در نظر گرفتن شروط ۱ و ۲ و با استفاده از (۴۱)، $\Delta \nabla M_{mn}^{pq}$ اثر چندمسیری کاربر است. با فرض ۳ اثر چندمسیری در مشاهدات کد در نمونه‌های مشابه با اثر چندمسیری در نمونه‌های مشابه روز بعد همبسته است. این به سبب تشابه ارتفاع و زاویه ماهواره‌های GPS در دو روز متوالی است (با ۴ دقیقه تأخیر (۲۴۰ ثانیه) در یک روز خورشیدی). جدول ۲ همبستگی نرمال شده اطلاعات اثر چند مسیری در چند روز را نشان می‌دهد. بنابراین اثر چندمسیری اطلاعات با استفاده از خصوصیت همبستگی قابل حذف و پس از حذف چندمسیری، مشاهدات کد مجدداً با افزایش دقت مکان‌یابی قابل محاسبه است. اطلاعات DD' حاصل از (۴۱) مطابق با شکل ۱۲ است. پس از آن که نویز فرکانس بالای اطلاعات DD' حاصل توسط CFC [۴۸] تا [۵۰] با پنجره ۵۰ s حذف شد همبستگی سیگنال‌های چندمسیری در شکل ۱۳ واضح‌تر است. فیلتر CFC در فرم بازگشتی مطابق با (۴۲) در نظر گرفته شده است

$$\bar{\chi}(t+1) = \frac{\tau-1}{\tau} \bar{\chi}(t) + \frac{1}{\tau} \bar{\chi}(t+1) \quad (42)$$

در (۴۲) نشان‌دهنده پنجره فیلتر، χ مقادیر DD' ، $\bar{\chi}$ مقادیر DD' فیلترشده و t نشان‌دهنده هر نمونه است. فاصله بین آنتن‌های دو ایستگاه حدود ۲۴۰ متر بود. آزمایش از ساعت ۱۰ صبح تا ۱۲ صبح ۱۲ تا ۱۶ تیر و برای پنج روز متوالی انجام شد. ماهواره با حداکثر زاویه ارتفاع به عنوان ماهواره مرجع انتخاب شد و در هر جفت ماهواره انتخابی ماهواره شماره ۱۳ با ارتفاع ۷۸ مرجع است.

در طول نمونه‌برداری این ماهواره دارای بالاترین ارتفاع بود. از آنجایی که پس از کاهش اثر چندمسیری، هدف موقعیت‌یابی است یک گروه ماهواره قابل دید و قابل استفاده برای تعیین موقعیت مجدد با استفاده از نرم‌افزار u-center استفاده می‌شوند. هرچند در همان زمان ماهواره‌های قابل دید دیگری نیز وجود داشته‌اند اما در این دوره زمانی گیرنده از این ۵ ماهواره برای موقعیت‌یابی بهره برده است. میانگین دقت مکان‌یابی بالطبع در ایستگاه کنار ساختمان بلند به دلیل اثر چندمسیری پایین است. شاخص خطای RMS مکان‌یابی برای گیرنده GPS مورد استفاده با ۳ ساعت نمونه‌برداری در ایستگاه مرجع ۱٫۷۶ متر و در ایستگاه کاربر ۳٫۹۸ به دست آمد که یکی از دلایل تفاوت این دو مقدار خطای چندمسیری است.

در شکل ۱۳ چندمسیری روز به روز (چهار روز) برای زوج ماهواره ۱۰-۱۳ نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود همبستگی چندمسیری در یک روز نسبت به روز بعد کاملاً مشهود است. همبستگی روز به روز چندمسیری دو نمونه به طور عددی نیز مورد بررسی قرار گرفت. همبستگی چندمسیری دو روز متوالی دارای همبستگی ۹۳ درصد است و این مقدار با گذشت زمان کاهش می‌یابد. البته ماهواره شماره ۲۳ خود دارای ارتفاع بالا می‌باشد و این به معنای اثر چندمسیری کم آن در مقایسه با سایر ماهواره‌هاست.

استفاده شود و برای جمع‌آوری این اطلاعات باید از ساختاری مشابه شکل ۱۱ استفاده کرد. اطلاعات مشاهدات کد برای دو ماهواره $i (i = p, q)$ با استفاده از دو آنتن $j (j = m, n)$ و با استفاده (۳۸) قابل نوشتن است

$$DD = (\rho_m^p - \rho_m^q) - (\rho_n^p - \rho_n^q) = \Delta \nabla r_{mn}^{pq} + \Delta \nabla I_{mn}^{pq} + \Delta \nabla T_{mn}^{pq} + \Delta \nabla M_{mn}^{pq} + \Delta \nabla \varepsilon \quad (38)$$

جایی که $\Delta \nabla r_{mn}^{pq}$ یک ترکیب خطی از r_j^i ، $\Delta \nabla M_{mn}^{pq}$ ترکیب خطی از اثر چندمسیری، $\Delta \nabla \varepsilon$ ترم نویز کد سیستم و $\Delta \nabla I_{mn}^{pq}$ و $\Delta \nabla T_{mn}^{pq}$ به ترتیب ترکیب اثرات یونسفریک و تروپوسفریک است. همه اثرات دارای واحد متر می‌باشد. $\Delta \nabla M_{mn}^{pq}$ قابل نگاشت با اثر چندمسیری دو ماهواره دو گیرنده است

$$\Delta \nabla M_{mn}^{pq} = (MP_m^p - MP_m^q) - (MP_n^p - MP_n^q) \quad (39)$$

به منظور سنجیدن اثر چندمسیری روی اطلاعات DD باید فاصله بین دو ایستگاه کم و کمتر از ۱۰ کیلومتر باشد و در این حالت اثرات یونسفریک و تروپوسفریک اثر یکدیگر را حذف می‌کند. برای آنتن استاتیک برای یک ماهواره مشخص r_j^i از رابطه زیر قابل محاسبه است

$$r_j^i = \sqrt{(x^i - x_j)^2 + (y^i - y_j)^2 + (z^i - z_j)^2} \quad (40)$$

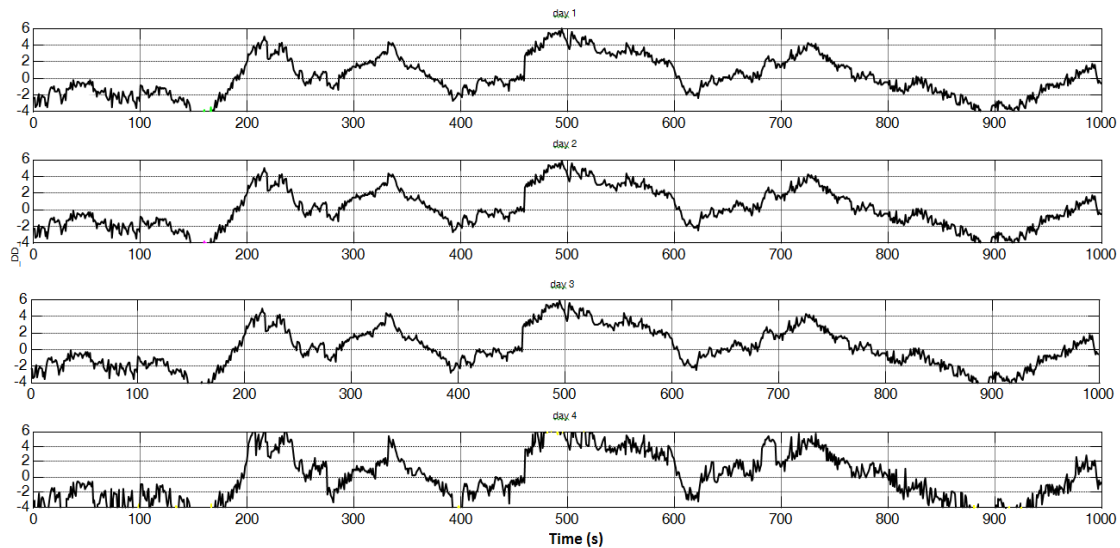
بنابراین $\Delta \nabla r_{mn}^{pq}$ قابل محاسبه و حذف از (۳۸) است. بنابراین اثر چندمسیری محدود به (۴۱) می‌شود

$$DD' = \Delta \nabla M_{mn}^{pq} + \Delta \nabla \varepsilon \quad (41)$$

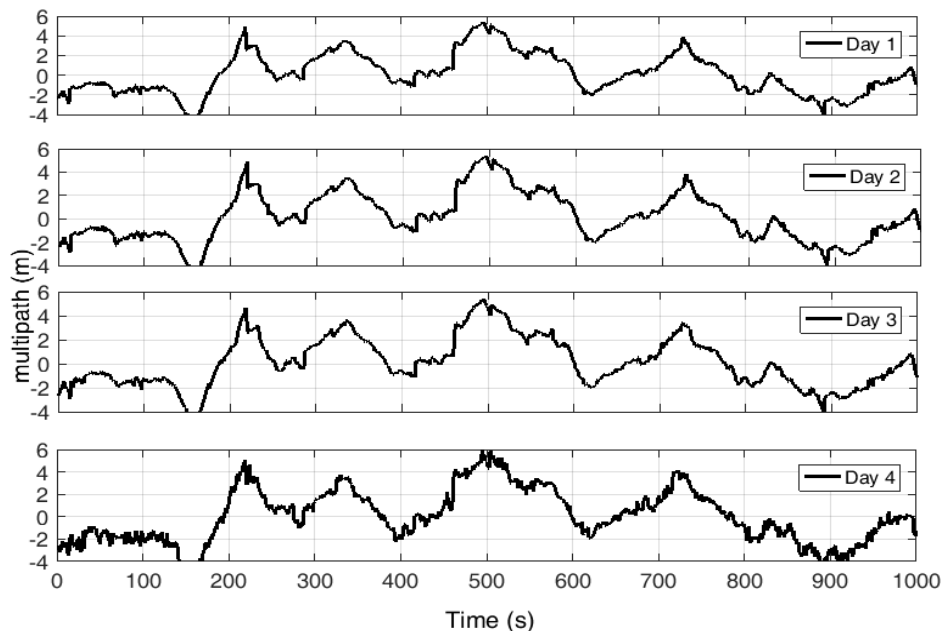
در رابطه بالا $\Delta \nabla \varepsilon$ با $\Delta \nabla M_{mn}^{pq}$ غیر همبسته است. در فاصله کم بین دو ایستگاه اثر چندمسیری برای یک آنتن ثابت مشخص و ماهواره معین با توجه به شرایط زیر قابل تحلیل است:

(۱) یک آنتن به عنوان آنتن مرجع باید در محیطی باز قرار گیرد و بنابراین فرض بر این است که این محیط چندمسیری-آزاد است در حالی که ایستگاه کاربر فرض است که تحت تأثیر چندمسیری است (مشابه شکل ۹).

(۲) در حین مشاهدات یک ماهواره با بالاترین ارتفاع به عنوان ماهواره مرجع انتخاب می‌شود و فرض بر این است که این ماهواره سیگنال را مستقیم و بی‌واسطه به ایستگاه‌ها می‌رساند (مشابه شکل ۱۰). در جدول ۱ EA ۵ ماهواره بر حسب درجه نشان داده شده و مطابق با این جدول و مطابق با انتظار ماهواره شماره ۱۳ دارای بالاترین ارتفاع است.



شکل ۱۲: اطلاعات DD'.



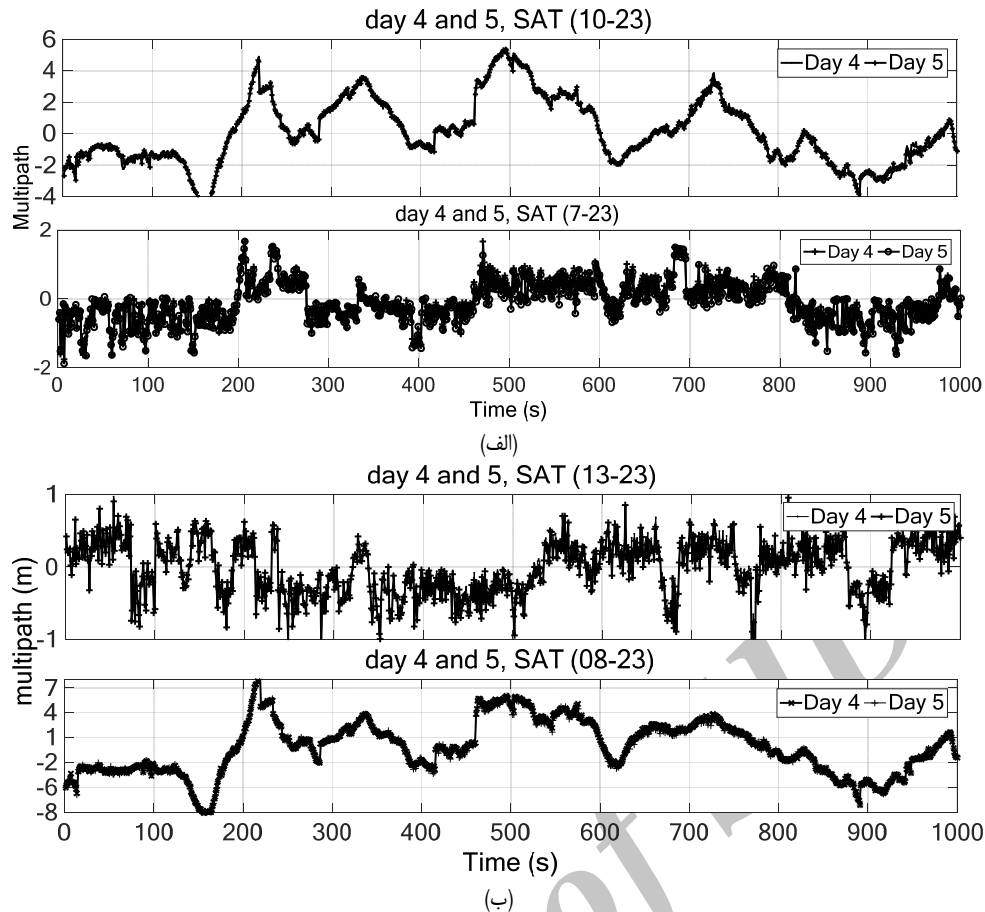
شکل ۱۳: چندمسیری برای زوج ماهواره ۱۳-۱۰ در ۴ روز متوالی.

SVM داده می‌شود. خروجی تقریبگر SVM مستقیماً برای تصحیح کد اندازه‌گیری شده روز ۱۶ تیر اعمال می‌شود تا خطای چندمسیری در آن کاهش یابد و موقعیت‌یابی خروجی به عنوان نتیجه منعکس می‌شود. شکل ۱۵ خطای چندمسیری کد برای ماهواره شماره ۸ و در تاریخ ۱۶ تیر ماه را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که تقریب‌زننده به خوبی توانسته پاسخگو باشد و پس از اعمال مقادیر تقریب، کد تصحیح‌شده با GSSVM، SVMPSO و GASVM دیده می‌شود. تصحیح خطای چندمسیری در شکل ۱۶ آمده و همان طور که دیده می‌شود پس از استفاده از مدل‌ها پراکنش خطا حول نقطه صفر متمرکز شده است. از طرفی مشهود است که عملکرد مدل PSOSVM بهتر از سایر روش‌ها است. عملکرد مدل PSOSVM، GASVM و GSSVM برای ۵ ماهواره موقعیت‌یاب مد نظر ما در شکل ۱۷ با استفاده از شاخص انحراف معیار نشان داده شده و عملکرد SVRهای متناسب با ماهواره‌های قابل دید مشخص گردیده است. همان طور که دیده می‌شود در این شاخص در هر ۴ ماهواره PSOSVM دارای کمترین مقدار است. جستجوی مبتنی بر تحقیق پارامترهای SVM باعث می‌شود که این پارامترها به درستی

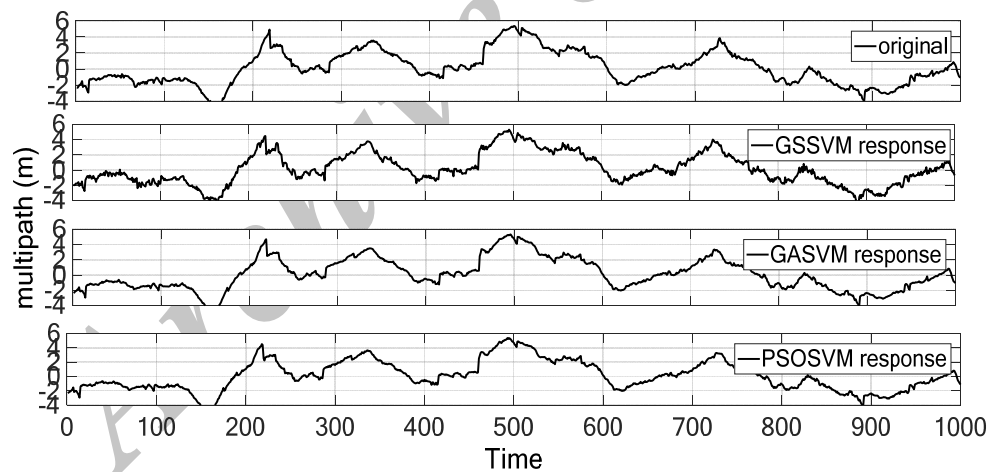
در شکل ۱۴ چندمسیری برای ۴ زوج ماهواره (۲۳-۱۰)، (۲۳-۱۳)، (۲۳-۷) و (۲۳-۸) در دو روز متوالی (۱۴-۱۵ تیر) پس از اعمال CFC نشان داده شده است. اطلاعات چند مسیری پس از اعمال فیلتر اطلاعات روز چهارم از ساعت ۱۰ تا ساعت ۱۰:۱۶:۴۰ با فرکانس نمونه‌برداری ۱ هرتز جمع‌آوری گردیده است.

۶- کاهش چندمسیری و موقعیت‌یابی

برای هر ماهواره اطلاعات آموزش با استفاده از اطلاعات آزمایشگاهی جمع‌آوری شده روز قبل فراهم می‌شود. نرمال‌سازی اطلاعات قبل از آموزش آن اتفاق می‌افتد، اطلاعات زوایه و ارتفاع ماهواره و همچنین اطلاعات چندمسیری در رنج $[-1, 1]$ نرمال می‌شود. حسن اصلی این نرمال‌سازی علاوه بر جلوگیری از سختی محاسبات عددی، جلوگیری از محدودیت مقادیر رنج عددی بزرگ‌تر نسبت به رنج عددی کوچک‌تر است. اطلاعات ورودی به SVM داده می‌شود. به طور کلی اطلاعات آموزش به این صورت است که از اطلاعات ۱۵ تیر ماه به عنوان ورودی استفاده می‌شود. اطلاعات DD پس از پردازش اولیه به عنوان ورودی به



شکل ۱۴: سری زمانی DD، (الف) دو جفت ماهواره (۲۳-۱۰ و ۲۳-۷) و (ب) دو جفت ماهواره (۲۳-۸ و ۲۳-۱۳).



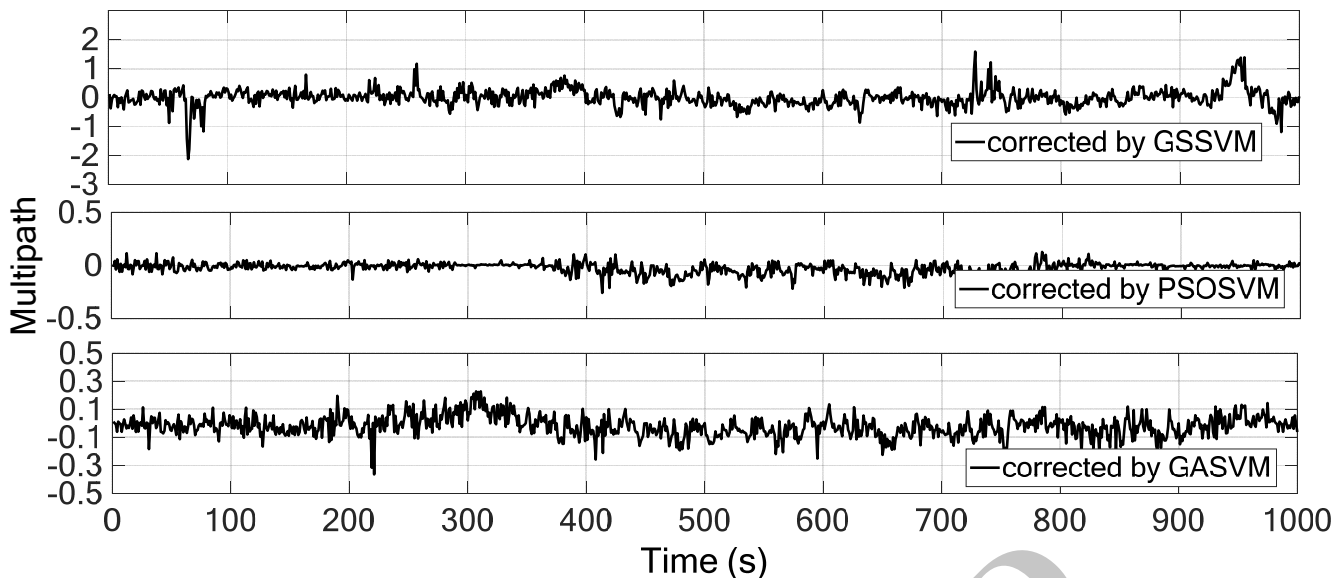
شکل ۱۵: خطای چندمسیری کد برای ماهواره شماره ۱۰ و در تاریخ ۱۶ تیر ماه، (الف) چندمسیری کد ماهواره ۱۴، (ب) تقریب چندمسیری توسط SVM، (ج) تقریب چندمسیری توسط GASVM و (د) تقریب چندمسیری توسط PSOSVM.

جدول ۳: شاخص خطای RMS (متر) برای بهبود خطای چندمسیری.

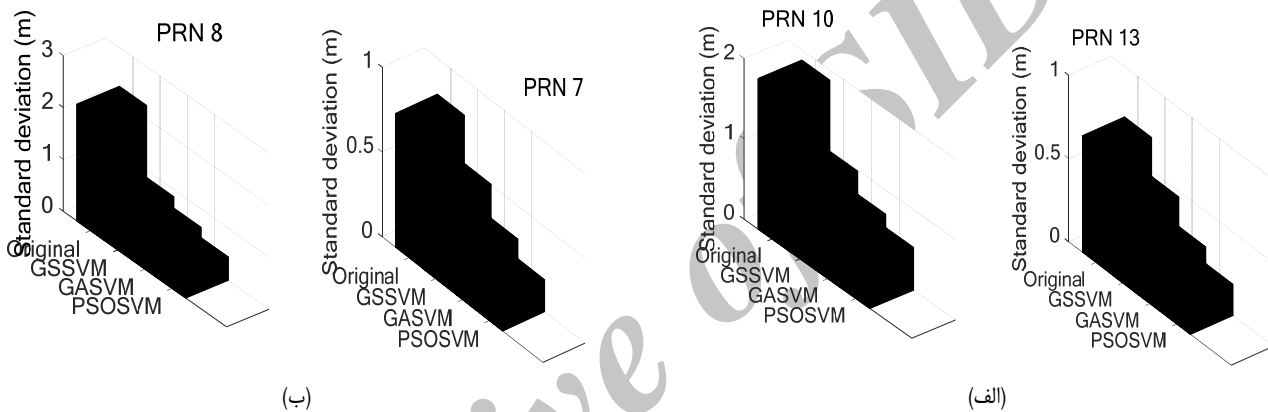
جفت ماهواره	مقدار واقعی	مقدار بهبودیافته با GSSVM	درصد بهبود	مقدار بهبودیافته با GASVM	درصد بهبود	مقدار بهبودیافته با PSOSVM	درصد بهبود
۲۳-۱۰	۱٫۲۲	۰٫۲۹۲	۷۶	۰٫۱۰۹	۹۱	۰٫۴۸	۹۶
۲۳-۸	۱٫۳۲	۰٫۳۰۳	۷۷	۰٫۱۰۵	۹۲	۰٫۶۶	۹۵
۲۳-۱۳	۰٫۶۳	۰٫۱۵۷	۷۵	۰٫۰۵۰	۹۲	۰٫۲۵	۹۶
۲۳-۷	۰٫۸۱	۰٫۱۹۴	۷۶	۰٫۰۷۲	۹۱	۰٫۳۲	۹۶

شاخص RMS برای PSOSVM کمتر از سایر روش‌هاست. درصد بهبود این روش در کاهش اثر چندمسیری به طور میانگین ۹۶ درصد می‌باشد در حالی که روش GSSVM در حدود ۷۵ درصد موفق بوده است. از آنجایی

تعیین نشود و عملکرد SVR کاهش یابد که این مهم در شکل ۱۷ مشخص است. در جدول ۳ درصد بهبود خطای RMS مربوط به DD با استفاده از سه روش منعکس شده است. از جدول مشخص است که



شکل ۱۶: تصحیح خطای چندمسیری ماهواره شماره ۱۰، (الف) با روش SVM، (ب) با روش PSOSVM و (ج) با روش GASVM.



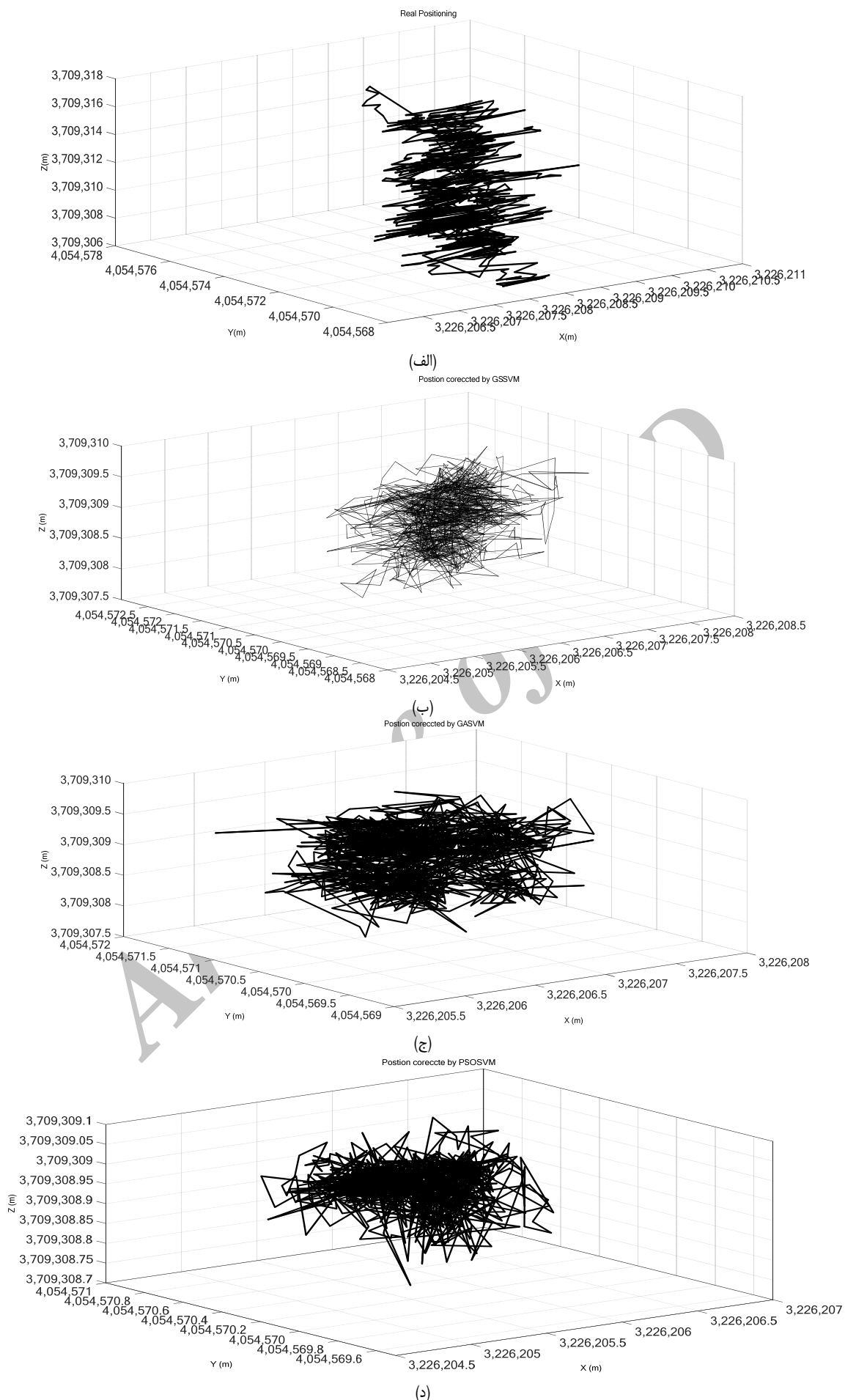
شکل ۱۷: شاخص انحراف معیار DD ، (الف) ماهواره ۱۳ و ۱۰ و (ب) ماهواره ۸ و ۷.

جدول ۴: شاخص خطای RMS (متر) برای مکان یابی.

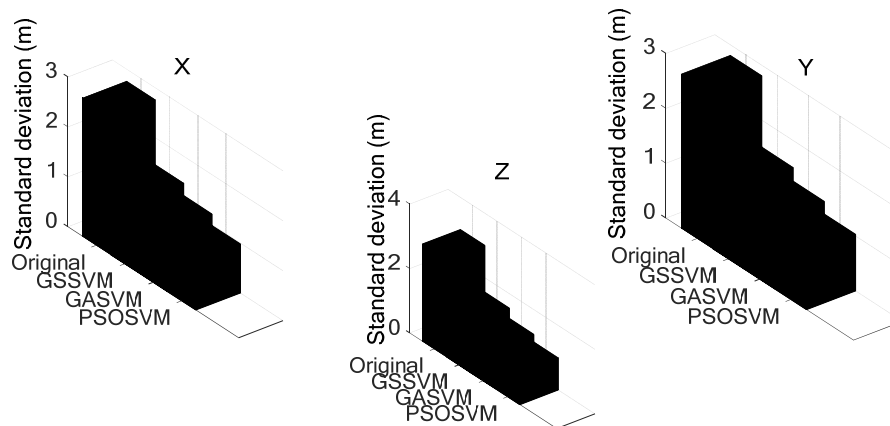
موقعیت	مقدار واقعی	مقدار بهبود یافته با GSSVM	درصد بهبود	مقدار بهبود یافته با GASVM	درصد بهبود	مقدار بهبود یافته با PSOSVM	درصد بهبود
X	۳٫۶۳	۱٫۸۸	۴۸	۱٫۷۷	۵۱	۱٫۵۹	۵۶
Y	۳٫۷۱	۱٫۹۶	۴۷	۱٫۸۱	۵۱	۱٫۷۰	۵۴
Z	۳٫۵۱	۱٫۸۲	۴۸	۱٫۶۸	۵۲	۱٫۵۴	۵۶

شده و از شکل مشهود است که خطای اطلاعات واقعی دریافت شده از گیرنده به سبب خطای چندمسیری زیاد است. استفاده از روش های تقریبی توانسته در کاهش این خطا مؤثر باشد که در این بین به ترتیب مدل های PSOSVM، GASVM و GSSVM موفق بوده است. اطلاعات تکفرکانسه GPS در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته و ماهواره با ارتفاع پایین تر دارای خطای چندمسیری بیشتر است. سه روش نرم افزاری برای کاهش اثر چندمسیری استفاده شد که حسن روش های پیشنهاد شده تعیین خودکار و صحیح پارامترهای کرنل و SVM بود. نتایج نشان داد که عملکرد دو مدل PSOSVM و GASVM بسیار بهتر از SVM با جستجوی هدایت شده است. عملکرد مدل PSOSVM اندکی بهتر از GASVM است و البته سرعت PSO در تعیین پارامترها و همگرایی آن در مقاسه با GA بسیار بهتر است. این امر به سبب کم تر بودن پارامترهای PSO نسبت به GA است. با کامپیوتر شخصی (۲٫۵GHz CPU، ۲GB RAM) در تقریب یک گام آینده دارای

که ماهواره شماره ۲۳ دارای بالاترین ارتفاع بوده است این ماهواره را برای هر ماهواره دیگر با ارتفاع پایین تر می توان به عنوان مرجع در نظر گرفت و سپس با تقریب چندمسیری هر یک به مکان یابی دقیق تری دست یافت. شکل ۱۸ موقعیت یابی را پس از اعمال کد تصحیح شده نشان می دهد. این اندازه گیری ها فقط با تصحیح چندمسیری است و سایر تصحیحات افزایش دقت در نظر گرفته نشده است. چهار نوع موقعیت یابی با گیرنده کاربر، با SVM، PSOSVM و با GASVM نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود مشاهدات با روش PSOSVM بیشتر حول نقطه میانگین متمرکز است و بنابراین روش PSOSVM در کاهش چندمسیری، مؤثرتر و در افزایش دقت مکان یابی موفق بوده است. جدول ۴ خطای RMS موقعیت یابی سه بعدی GPS کاربر را نشان می دهد. مشهود است که کاهش چندمسیری با الگوریتم PSOSVM به اندازه ۹۶ درصد موفقیت آمیز و حدوداً ۵۰ درصد در افزایش دقت مکان یابی مؤثر بوده است. در شکل ۱۹ شاخص انحراف معیار برای بررسی استفاده



شکل ۱۸: موقعیت‌یابی سه‌بعدی پس از اعمال کد تصحیح‌شده با الگوریتم‌های مختلف، (الف) مقادیر واقعی، (ب) GSSVM، (ج) GASVM و (د) PSOSVM.



شکل ۱۹: شاخص انحراف معیار خطای مکان یابی سه بعدی قبل و بعد از بهبود.

جدول ۵: مقایسه روش های پیشنهادی این مقاله با سایر مقالات.

مرجع	سال	عنوان روش	درصد کاهش چندمسیری (انحراف معیار)	مبتنی بر کد/ فاز	درصد افزایش دقت مکان یابی (انحراف معیار)
۳۳	۲۰۱۴	SWT	۹۵	کد	-
۳۳	۲۰۱۴	WT	۸۶	کد	-
۳۴	۲۰۱۳	SVR	۹۱	کد	۳۵-۴۲
۳۶	۲۰۰۶	CSF	۵۸	فاز	۴۰
۷	۲۰۰۰	FIR	۷۵	فاز	۴۳
۳۷	۲۰۰۴	FFT	۷۰	فاز	-

model," *J. of Electrical and Computer Engineering Innovations*, vol. 1, no. 1, pp. 43-50, May 2013.

- [3] M. H. Refan, A. Dameshghi, and M. Kamarzarrin, "Real time pseudo-range correction predicting by a hybrid GASVM model in order to improve RTDGPS accuracy," *Iranian J. of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 215-223, Dec. 2013.
- [4] M. H. Refan, A. Dameshghi, and M. Kamarzarrin, "Improving RTDGPS accuracy using hybrid PSOSVM prediction model," *Aerospace Science and Technology*, vol. 37, no. 7, pp. 55-69, Aug. 2014.
- [5] T. L. Dammalage, C. Satirapod, S. Kibe, and C. Ogaja, "C/A code multipath mitigation at GPS base stations for improved DGPS corrections using wavelets," *Survey Review*, vol. 42, no. 317, pp. 240-255, Jul. 2010.
- [6] J. W. Erickson, P. S. Maybeck, and J. F. Raquet, "Multipath-adaptive GPS/INS receiver," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 41, no. 2, pp. 645-657, Apr. 2005.
- [7] L. Ge, S. Han, and C. Rizos, "Multipath mitigation of continuous GPS measurements using an adaptive filter," *GPS Solutions*, vol. 4, no. 2, pp. 19-30, Oct. 2000.
- [8] C. Satirapod and C. Rizos, "Multipath mitigation by wavelet analysis for GPS base station applications," *Survey Review*, vol. 38, no. 295, pp. 2-10, Jan. 2010.
- [9] J. M. Tranquilla, J. P. Carr, and H. M. Al-Rizzo, "Analysis of a choke ring groundplane for multipath control in global positioning system (GPS) applications," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 7, pp. 905-911, Jul. 1994.
- [10] E. M. Souza, J. F. G. Monico, A. Pagamisse, and W. G. C. Polezel, "An effective wavelet method to detect and mitigate low-frequency multipath effects VI Hotine-Marussi Symp," *Theoretical and Computational Geodesy*, vol. 132, pp. 179-184, 2008.
- [11] F. ScireScappuzzo and S. N. Makarov, "A low-multipath wideband GPS antenna with cutoff or non-cutoff corrugated ground plane," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 1, pp. 33-46, Jan. 2009.
- [12] E. M. Souza and J. F. G. Monico, "Wavelet shrinkage: high frequency multipath reduction from GPS relative positioning," *GPS Solutions*, vol. 8, no. 3, pp. 152-159, Sept. 2004.
- [13] L. Ge, S. Han, and C. Rizos, "GPS multipath change detection at permanent GPS stations," *Survey Review*, vol. 36, no. 283, pp. 306-322, Jan. 2002.
- [14] L. Ge, S. Han, and C. Rizos, "GPS multipath change detection at permanent GPS stations," *Survey Review*, vol. 36, no. 283, pp. 306-322, Jan. 2002.
- [15] M. Tranquilla, J. P. Carr, and H. M. Al-Rizzo, "Analysis of a choke ring groundplane for multipath control in global positioning system

۲/۰۱ میلی ثانیه زمان پردازش است در حالی که این مقدار برای GASVM ۴/۹۳ است. به منظور مقایسه روش های پیشنهادی این مقاله با مقالات دیگر جدول ۵ آمده و این مقایسه در درصد کاهش اثر چندمسیری انجام شده است. از آنجایی که مکان یابی بر اساس کد و گیرنده ارزان قیمت با مکان یابی بر اساس فاز و گیرنده گران قیمت قابل مقایسه نیست، در این فاکتور نیز بر اساس درصد افزایش دقت مکان یابی مقایسه صورت گرفته و همچنین روش های نرم افزاری مد نظر قرار گرفته است.

۷- نتیجه گیری

یک الگوریتم جدید برای کاهش چندمسیری بر اساس SVM به کار گرفته شد. بر اساس تحلیل اطلاعات هندسی سیگنال منعکس شده چندمسیری مدلی برای اثر چندمسیری قابل استخراج است. اطلاعات یک گیرنده ارزان قیمت GPS و بر اساس کد- شبهه فاصله برای آزمایشات استفاده شد. نتایج نشان داد که یک بهبود بسیار مناسب در موقعیت یابی حاصل شده و خطای RMS مربوط به DD کاهش یافته است. روش PSOSVM در حدود ۹۶ درصد در کاهش این اثر مؤثر بوده است در حالی که روش SVM و GASVM به ترتیب ۷۶ و ۸۹ درصد موفقیت داشته اند. این نتایج نشان می دهد که استفاده از PSO در تعیین پارامترهای اساسی SVM و کرنل در عملکرد و قابلیت آن تأثیر بسزایی دارد. همچنین شبیه سازی ها نشان داد که استفاده از این روش در پایداری نتایج GPS مؤثر بوده و مشاهدات حول نقطه میانگین متمرکز است.

مراجع

- [1] M. H. Refan, A. Dameshghi, and M. Kamarzarrin, "Real-time differential global poisoning system stability and accuracy improvement by utilizing support vector machine," *International J. of Wireless Information Networks*, vol. 23, no. 1, pp. 66-81, Mar. 2016.
- [2] M. H. Refan and A. Dameshghi, "RTDGPS implementation by online prediction of GPS position components error using GA-ANN

- measurements," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 55, no. 4, pp. 1275-1285, Mar. 2007.
- [31] N. Zheng, L. Cai, H. Bian, and C. Lin, "Hybrid particle filtering algorithm for GPS multipath mitigation," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 24, no. 5, pp. 1554-1561, May 2014.
- [32] G. Audrey, T. Jean-Yves, and C. Vincent, "A particle filtering approach for joint detection/estimation of multipath effects on GPS measurements," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 55, no. 4, pp. 1275-1285, Apr. 2007.
- [33] M. R. Azarbad and M. R. Mosavi, "A new method to mitigate multipath error in single-frequency GPS receiver with wavelet transform," *GPS Solutions*, vol. 18, no. 2, pp. 189-198, Apr. 2014.
- [34] P. Quoc-Huy, T. Su-Lim, and M. Ian, "GPS multipath mitigation: a nonlinear regression approach," *GPS Solutions*, vol. 17, no. 3, pp. 371-380, Jul. 2013.
- [35] G. Felipe, N. Kristine, and M. Larson, "An open source GPS multipath simulator in matlab/octave," *GPS Solutions*, vol. 18, no. 3, pp. 473-481, Jul. 2014.
- [36] P. Misra and P. Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, 2nd Edn. I/Ganga-Jamuna Press, Massachusetts, 2006.
- [37] Y. Zhang and C. Bartone, "Multipath mitigation in frequency domain," in *Proc. of the IEEE/ION PLANS*, vol. 3, pp. 486-495, Athens, OH, USA, 26-29 Apr. 2004.
- (GPS) applications," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 7, pp. 905-911, Jul. 1994.
- [16] J. K. Ray, M. E. Cannon, and P. Fenton, "Mitigation of static carrierphase multipath effects using multiple closely spaced antennas," *The J. of Navigation*, vol. 46, no. 3, pp. 193-202, Sept. 1999.
- [17] B. R. Townsend and P. C. Fenton, "A practical approach to the reduction of pseudorange multipath errors in a LI GPS receiver," in *Proc. ION GPS-94, U.S. Inst. of Navigation*, vol. 7, pp. 143-148, Salt Lake City, USA, Sept. 1994.
- [18] R. D. J. Van Nee, J. Sierveld, P. C. Fenton, and B. R. Townsend, "The multipath estimating delay lock loop: approaching theoretical accuracy limits," in *Proc. IEEE Symp. Position, Locat. Navig.*, vol. 1, pp. 246-251, Las Vegas, USA, Apr. 1994.
- [19] D. Moelker, "Multiple antennas for advanced GNSS multiple mitigation and multipath direction finding," in *Proc. of ION GPS-97, Kansas City*, vol. 1, pp. 541-550, Sept. 1997.
- [20] L. Huicui, L. Xiaojing, G. Linlin, R. Chris, and W. Feixue, "Variable length LMS adaptive filter for carrier phase multipath mitigation," *GPS Solutions*, vol. 15, no. 1, pp. 29-38, Jan. 2011.
- [21] H. Liu, X. Li, L. Ge, C. Rizos, and F. Wang, "Variable length LMS adaptive filter for pseudorange multipath mitigation based on SydNET stations," *J. of Applied Geodesy*, vol. 3, no. 1, pp. 35-46, Dec. 2008.
- [22] W. Ulrich, R. Noor, and P. Collier, "Mitigation of periodic GPS multipath errors using a normalised least mean square adaptive filter," *J. of Spatial Science*, vol. 54, no. 1, pp. 1-13, Jun. 2009.
- [23] C. Satirapod, R. Khoonphool, and C. Rizos, "Multipath mitigation of permanent GPS stations using wavelets," in *Proc. Int. Symp. on GPS/GNSS*, pp. 15-18, Tokyo, Japan, Nov. 2003.
- [24] E. M. Souza, J. F. G. Monico, W. G. C. Polezel, and A. Pagamisse, "An effective wavelet method to detect and mitigate low-frequency multipath effects," in *Proc. VI Hotine-Marussi Symp on Theoretical and Computational Geodesy*, pp. 179-184, Wuhan, China 29 May-2 Jun., 2006.
- [25] Y. W. Lee, Y. C. Suh, and R. Shibasakia, "A simulation system for GNSS multipath mitigation using spatial statistical methods," *Computers & Geosciences*, vol. 34, no. 11, pp. 1597-1609, Nov. 2008.
- [26] M. R. Mosavi, "A practical approach for accurate positioning with LI GPS receivers using neural networks," *J. of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 159-171, Jan. 2006.
- [27] A. Bilich and K. M. Larson, "Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR)," *Radio Science*, 2007.
- [28] A. Bilich, K. M. Larson, and P. Axelrad, "Modeling GPS phas multipath with SNR: Case study from Salar de Uyuni, Bolivia," *Geophys Res*, 2008.
- [29] C. Rost and L. Wanninger, "Carrier phase multipath mitigation based on GNSS signal quality measurements," *J. of Applied Geodesy*, vol. 3, no. 2, pp. 81-87, Jun. 2009.
- [30] A. Giremus, J. Y. Tourneret, and V. Calmettes, "A particle filtering approach for joint detection/estimation of multipath effects on GPS

محمد شمسی اسفندآبادی در سال ۱۳۷۹ مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق از دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل دریافت کرد. وی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی برق - بیوالکترونیک در دانشگاه تربیت مدرس در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۶ به پایان رساند. او هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: پردازش تصویر، فیلترهای تطبیقی و شبکه‌های توزیع شده تطبیقی

محمدحسین رفان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری به ترتیب در سال‌های ۱۳۵۶، ۱۳۷۱ و ۱۳۷۹ از دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: سیستم‌های کنترل صنعتی، سیستم‌ها تعیین و تشخیص خطا و سیستم‌های موقعیت‌یاب ماهواره‌ای.

عادل دمشقی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ از دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی دکتری دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی در رشته مهندسی برق گرایش الکترونیک می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: توابع بولی، سامانه‌های مکان‌یاب جهانی، توربین‌های بادی، پایش وضعیت و عیب‌یابی هوشمند.