

علمی - پژوهشی

کاهش اثر تداخل در سامانه ناوبری GPS با استفاده از فیلتر شکاف تکاملی

مهديه عباسی^۱، سيد محمدرضا موسوی ميرکلائی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد و ۲- استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۹/۰۳، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲)

چکیده

با توجه به استفاده روزافزون سامانه ناوبری GPS در حوزه‌های مختلف، افزایش دقت و کارایی این سامانه اهمیت ویژه‌ای دارد. سیگنال مخابره شده از ماهواره‌ها مسافت زیادی را تا رسیدن به گیرنده موجود در سطح زمین طی می‌کند که این امر منجر به کاهش توان سیگنال می‌گردد. این سیگنال ضعیف می‌تواند به راحتی تحت تأثیر سیگنال‌های تداخل عمدی (یا به اصطلاح جمینگ) و یا حتی غیرعمدی قرار گیرد. یکی از موزی‌ترین تداخل‌ها، جمینگ موج پیوسته (CW) است. محبوب‌ترین روش کاهش تأثیر این تداخل بر روی سیگنال GPS فیلتر شکاف می‌باشد. بنابراین در این مقاله، برای مقابله با اثر جمینگ CW بر سیگنال GPS، استفاده از یک فیلتر شکاف تطبیقی با پاسخ ضریب نامحدود پیشنهاد گردیده است که برای تطبیق ضرایب آن متناسب با توان و فرکانس جمینگ اعمال شده، یکی از انواع الگوریتم تکاملی PSO به نام IPSO مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم‌های تکاملی برای یافتن پاسخ مسائلی به کار می‌روند که هیچ راه حل مشخصی برای آن‌ها وجود ندارد و این دقیقاً چیزی است که برای رفع اشکال طراحی فیلتر دیجیتال مورد نیاز است. همچنین استفاده از الگوریتم تکاملی منجر به سادگی روند تطبیق می‌شود چرا که از انجام عملیات ریاضی سخت و پیچیده جلوگیری می‌کند. در نهایت، کارایی روش پیشنهادی با روش‌های مشابه مقایسه شده است. نتایج عدد نشان می‌دهد که روش پیشنهادی علاوه بر بهبود بسیار چشمگیر در شباهت سیگنال بازیابی شده به سیگنال بدون اختلال (به طور متوسط ۹۹ درصد)، تعداد ماهواره‌های اکتساب شده را در تمام بازه توان جمینگ، به شش ماهواره رسانده است. همچنین خطای موقعیت‌یابی کاربر را که به عنوان هدف اصلی گیرنده GPS می‌باشد به میزان بسیار زیادی کاهش داده است.

کلیدواژه‌ها: فیلتر شکاف، جمینگ، سامانه ناوبری GPS.

۱- مقدمه

بیشتر از توانایی ضدجمینگ سیستم باشد، به شدت کاهش می‌یابد [۳]. در میان همه انواع منابع جمینگ، تداخل موج پیوسته (CW^۴) و تداخل‌های پالس CW تأثیر شدیدتری بر کیفیت سیگنال دریافتی GPS دارند [۴]. این تداخل‌ها به راحتی ADC^۵ گیرنده را در بخش آنالوگ سرچلویی از کار انداخته و عملکرد GPS را فلج می‌سازد.

به منظور مقابله با جمینگ در گیرنده GPS از فیلترهایی در حوزه فضا، زمان، فرکانس و حوزه زمان - فرکانس استفاده می‌شود. هرچند استفاده از فیلتر در حوزه فضا می‌تواند نسبت سرکوب بهتری برای جمر داشته باشد، اما آنتن‌های آرایه‌ای در اکثر کاربردها قابل نصب نیستند. برای رویکرد فیلتر زمان - فرکانس، پیچیدگی سخت‌افزار نیز یک مسئله است.

متداول‌ترین روش‌هایی که در گیرنده GPS برای مقابله با جمینگ به کار برده می‌شوند، روش‌های مبتنی بر پردازش سیگنالی قبل از همبسته‌گیری است. این دسته از روش‌ها بر

در سال‌های اخیر استفاده از سیستم موقعیت‌یابی جهانی (GPS^۱) در کاربردهای نظامی و حتی غیرنظامی بسیار افزایش یافته است. گیرنده‌های GPS در محیط‌های بدون اغتشاش و نویز از دقت قابل قبولی برخوردارند و به راحتی می‌توانند نیازهای دنیای امروز را برآورده سازند [۱]. سیگنال‌های تداخل که به نوع عمدی آن جمینگ گفته می‌شود، به علت تأثیر بر بخش کنترل‌کننده بهره خودکار (AGC^۲) و تقویت‌کننده کم نویز (LNA^۳) در بخش سرچلویی RF و همچنین تأثیر بر روی حلقه ردیابی کد حامل و اکتساب را می‌توان به عنوان یکی از تأثیرگذارترین تخریب‌کننده‌های عملکرد گیرنده‌های GPS در نظر گرفت [۲].

گیرنده GPS به طور ذاتی با توجه به ویژگی‌های طیف گسترده خود دارای توانایی ضدجمینگ می‌باشد، با این حال عملکرد گیرنده‌های GPS هنگامی که توان سیگنال جمینگ

* رایانامه نویسنده مسئول: m_mosavi@iust.ac.ir

^۴ Continuous Wave^۵ Analog-to-Digital Converter^۱ Global Positioning System^۲ Automatic Gain Control^۳ Low Noise Amplifier

است. نویسندگان مرجع [۸]، فرکانس یک فیلتر شکاف با پاسخ ضربه نامحدود (IIR) درجه دو را توسط تبدیل فوریه سریع (FFT) به دست آورده‌اند، اما برای یافتن توان تداخل که رابطه مستقیم با پهنای باند و عمق شکاف دارد، چاره‌ای نیندیشیده و تنها از جدولی آماده استفاده نموده‌اند. به‌طور مشابه در همان سال گروهی دیگر از یک فیلتر شکاف IIR درجه یک استفاده کرده‌اند. هر دو پارامتر فرکانس و پهنای باند این فیلتر طی چهار مرحله و با بهره‌گیری از FFT و حد آستانه مورد نظر به دست آمده است [۹]. در سال ۲۰۱۹ نیز یک فیلتر شکاف IIR درجه دو استفاده شده که به‌صورت کامل تطبیقی می‌باشد. به این معنی که محاسبه همه پارامترها به‌صورت تطبیقی است. الگوریتم به‌کار گرفته شده برای یافتن پارامترها الگوریتم NLMS می‌باشد [۱۰]. دسته‌ای دیگر از روش‌های مورد استفاده برای حذف تأثیر تداخل روش‌های ترکیبی از جمله ترکیب ANF با شبکه عصبی [۱۱]، با ACM [۱۲] و با تبدیل موجک [۱۳] می‌باشند.

دسته‌ای دیگر از الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی، الگوریتم‌های تکاملی^۳ نام دارند. این الگوریتم‌ها دارای ویژگی‌های متفاوتی نسبت به دیگر روش‌های معرفی شده می‌باشند. الگوریتم‌های تکاملی برای یافتن مسیر درست، تنها به ارزیابی تابع هزینه نیاز دارند. بنابراین به محاسبه مشتق و توابع کمکی نیاز نیست و این عمل موجب افزایش سرعت می‌گردد. همچنین به دلیل جستجوی موازی، احتمال به دام افتادن در کمینه‌های محلی کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال‌هایی از الگوریتم تکاملی می‌توان به الگوریتم ژنتیک^۴ (GA)، الگوریتم هجوم ذرات^۵ (PSO)، الگوریتم کلونی مورچگان^۶ (ACO) و الگوریتم کلونی زنبور عسل^۷ (BCO) اشاره نمود.

در این مقاله، یک فیلتر شکاف تکاملی برای مقابله با جمینگ ارائه شده است که با تطبیق وزن‌های فیلتر شکاف توسط الگوریتم تکاملی PSO سعی در کاهش اثر جمینگ بر سیگنال GPS دارد.

سازمان‌دهی مقاله به شرح ادامه است. بخش دوم به توصیف سیستم و همچنین معرفی تداخل مورد نظر می‌پردازد. در بخش سوم کلیاتی درباره فیلتر شکاف تطبیقی و نحوه تطبیق وزن‌های آن بیان شده است. در ادامه، در بخش چهارم به معرفی الگوریتم تکاملی و مزایا و معایب آن پرداخته شده است. در بخش پنجم روش پیشنهادی برای حذف جمینگ موج پیوسته با استفاده از فیلتر شکاف و مبتنی بر الگوریتم تکاملی PSO معرفی گردیده است. بخش شش به معیارهای ارزیابی عملکرد روش ضدجمینگ

روی سیگنال IF خارج‌شده از مبدل آنالوگ به دیجیتال در گیرنده پردازش انجام می‌دهند. فیلتر در حوزه زمان - فرکانس (استفاده از ابزارهای تبدیل فوریه، بانک فیلترها، تبدیل موجک و ...) و فیلتر تطبیقی (در هر دو حوزه زمان و فرکانس) نیز در این دسته قرار می‌گیرند. فیلتر شکاف یکی از پرکاربردترین روش‌های مبتنی بر فیلتر تطبیقی برای حذف جمینگ CW می‌باشد.

فیلتر شکاف یک تعمیم از فیلتر میان‌گذر به نام "فیلتر باند توقف" است که پهنای باند آن بسیار باریک می‌باشد. بنابراین تمام طیف فرکانس سیگنال به‌جز فرکانس تداخل را عبور می‌دهد. در نتیجه، پهنای باند سیگنال حفظ شده و تنها مؤلفه تداخل حذف می‌شود. همچنین اگر فرکانس تداخل جابه‌جا شود، فیلتر شکاف باید توانایی منطبق شدن بر این جابه‌جایی را داشته باشد، بنابراین فیلتر باید بتواند تداخل را دنبال کرده و آن را حذف کند. در واقع، فیلتر وفقی، سامانه‌ای است که می‌تواند ضرایب خود را به‌طور خودکار با توجه به محیط و یا سیگنال ورودی تنظیم نماید. فیلترهای وفقی با توجه به مزایای گسترده خود زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که درباره ویژگی‌های سیگنال اطمینان کافی وجود ندارد [۵، ۶].

فیلتر شکاف در حوزه آنالوگ به‌خوبی حوزه دیجیتال قابل پیاده‌سازی می‌باشد. اما سامانه‌های دیجیتال به دلیل عدم وابستگی به وضعیت محیط اطراف، نبود اثر پیری، ساده و کم‌هزینه بودن تولید انبوه با دقتی یکسان، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند [۷].

به‌منظور طراحی فیلتر دیجیتال الگوریتم‌های متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند که از بین آن‌ها می‌توان به الگوریتم حداقل میانگین مربعات^۱ (LMS)، LMS نرمال شده (NLMS)، الگوریتم LMS با اندازه گام متغیر (VSLMS)، الگوریتم LMS نرمال شده با اندازه گام متغیر (VSNLMS)، الگوریتم حداقل مربع بازگشتی^۲ (RLS) و الگوریتم RLS-QR اشاره نمود. الگوریتم‌های LMS و RLS از رایج‌ترین الگوریتم‌ها هستند که کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. از نظر محاسبات و حجم حافظه مورد نیاز، الگوریتم LMS مؤثرترین الگوریتم می‌باشد. همچنین، مشکل ناپایداری عددی دو الگوریتم دیگر را ندارد. بنابراین، الگوریتم LMS به اولین انتخاب در بسیاری از کاربردها تبدیل گردیده است [۶].

در سال‌های گذشته روش‌های بسیار گوناگونی برای کاهش تأثیر تداخل بر روی سیگنال GPS و افزایش دقت مکان‌یابی معرفی شده که در ادامه به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره شده

^۳ Evolutionary Algorithm^۴ Genetic Algorithm^۵ Particle Swarm Optimization^۶ Ant Colony Optimization^۷ Bee Colony Algorithm^۱ Least Mean Square Algorithm^۲ Recursive Least Square Algorithm

سیگنال دریافتی پس از عبور از فیلتر میان گذر، تقویت شده و فرکانس آن RF به IF تبدیل می‌گردد. این سیگنال توسط بخش ADC نمونه‌برداری می‌شود که نمونه k -ام آن را به شکل رابطه (۵) نشان داده می‌شود [۱۶].

$$r(k) = s(k) + j(k) + n(k) \quad (۵)$$

جمینگ، تداخلی است عمدی که توسط یک دشمن با فرکانس و توانی دلخواه در سطح زمین تولید شده و با سیگنال فرستاده شده همراه می‌شود. از آنجایی که توان سیگنال فرستاده شده توسط ماهواره متناسب با مجذور فاصله کاهش می‌یابد، سیگنال GPS تا رسیدن به سطح زمین بسیار ضعیف شده، اما سیگنال جمینگ مسافت کمتری را طی می‌کند و در نتیجه کمتر تضعیف شده و اثر آن روی سیگنال GPS غیرقابل چشم پوشی است. تداخل موج پیوسته به دلیل سادگی در تولید و اثر تخریبی شدیدی که دارد یکی از پرکاربردترین تداخل‌های موجود است که در دسته تداخل‌های باریک‌بند قرار دارد و می‌توان آن را به صورت رابطه (۶) توصیف کرد که P_j توان سیگنال GPS، f_j و θ_j به ترتیب فرکانس و فاز حامل سیگنال است [۱، ۱۷، ۱۸].

$$j(t) = \sqrt{2P_j} \cos(2\pi f_j t + \theta_j) \quad (۶)$$

سامانه GPS به دلیل استفاده از یک روش دستیابی چندگانه، در برابر جمینگ مقاومت ذاتی دارد. در این روش که دسترسی چندگانه تقسیم کد (CDMA) نام دارد، همه ماهواره‌ها در یک زمان از فرکانسی واحد برای حامل استفاده می‌کنند. بنابراین سیگنال‌های ارسالی به دلیل انتشار بر روی یک دنباله PRN خاص برای هر ماهواره، با یکدیگر تداخل پیدا نمی‌کنند. خاصیت ضدجمینگ CDMA به دلیل انجام فرآیند معکوس گسترده‌سازی^۲ روی سیگنال‌ها در گیرنده می‌باشد. همبسته‌سازی^۳ طیف دریافت شده در آنتن گیرنده که به نویز محیطی و جمینگ آغشته گشته است را در کد مدل‌سازی شده توسط گیرنده^۴ ضرب می‌کند تا برای عملیات رهیابی و ردیابی آماده شود. پس از آن، طیف داده استخراج شده فیلتر می‌شود. استفاده از تابع ضرب منجر به خروج اطلاعات از نویز می‌شود که در صورت وجود تداخل قوی ممکن است این عملکرد به شدت تضعیف شده و پس از ضرب کد بازسازی شده در کد دریافتی، تداخل در سراسر پهنای باند سیگنال منتشر شود. در حلقه ردیابی پس از عبور سیگنال از

اشاره کرده و در نهایت، در بخش هفت، عملکرد روش پیشنهادی بررسی و با روش‌های مشابه مقایسه شده است.

۲- توصیف سیستم

سیگنال‌های GPS در باند UHF که محدوده فرکانسی 500MHz (3GHz - را پوشش می‌دهند، مخابرات می‌گردند و دو فرکانس مورد استفاده برای حامل $L1$ و $L2$ ضریبی از فرکانس مرجع $f_0 = 10.23MHz$ می‌باشند.

$$f_{L1} = 154f_0 = 1575.42 \text{ MHz} \quad (۱)$$

$$f_{L2} = 120f_0 = 1227.60 \text{ MHz} \quad (۲)$$

هر سیگنال GPS شامل سه بخش اصلی حامل، داده ناوبری و کد مسافت‌یابی می‌باشد. حامل، موجی سینوسی با فرکانس‌های f_{L1} و f_{L2} بوده که داده ناوبری بر آن سوار می‌شود. داده ناوبری که نرخ بیتی برابر با 50 bps دارد، شامل اطلاعات جمع‌آوری شده از ماهواره‌ها است. هر ماهواره دو کد خاص C/A و P(y) تولید می‌کند. کد C/A یک سری ۱۰۲۳ بیتی است که هر 1 ms یک‌بار تکرار می‌شود، در نتیجه نرخ چیبی برابر با 10.23 MHz دارد. این کد به دسته‌ای خاص از خانواده کدها به نام کد طلایی تعلق دارد که دارای خواصی منحصر بفرد می‌باشند. این کدها همچنین به علت ویژگی‌های تصادفی که دارند، PRN نام گرفته‌اند.

کد P طولانی‌تر از کد C/A ($2.35 * 10^4 \text{ chips}$)، اما با همان نرخ چیب است. این به معنی به‌روز شدن هفتگی کد P می‌باشد. سیگنالی که توسط یک ماهواره ارسال می‌شود به صورت رابطه (۳) خواهد بود.

$$s(t) = \sqrt{2P_c} (C(t) \oplus D(t)) \cos(2\pi f_{L1} t) + \sqrt{2P_{PL1}} (p(t) \oplus D(t)) \sin(2\pi f_{L1} t) + \sqrt{2P_{PL2}} (p(t) \oplus D(t)) \sin(2\pi f_{L2} t) \quad (۳)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود فرکانس f_{L1} در مدوله کردن هر دو نوع کد استفاده می‌شود، در حالی که فرکانس f_{L2} تنها برای کد P در کاربردهای نظامی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴].

سیگنال دریافتی در گیرنده به صورت رابطه (۴) خواهد بود که علاوه بر سیگنال فرستاده شده توسط فرستنده، شامل سیگنال جمینگ و نویز سفید گوسی نیز می‌باشد. باید توجه داشت که این سه سیگنال مستقل از یکدیگر هستند و همچنین منابع جمینگ دارای پهنای باندی بسیار باریک‌تر از سیگنال GPS می‌باشند [۱۵].

$$r(t) = s(t) + j(t) + n(t) \quad (۴)$$

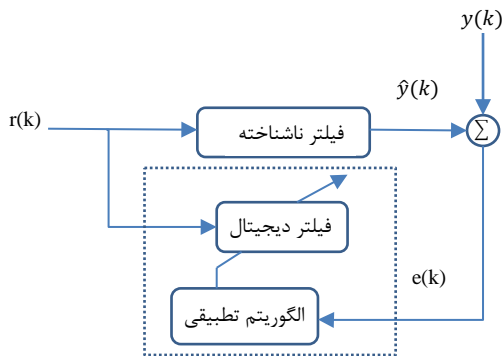
^۱ Pseudo-Random-Noise

^۲ Code Division Multiple Access

^۳ Despreading

^۴ Correlator

^۵ Receiver Code Replica



شکل (۲): بلوک دیاگرام فیلتر شکاف تطبیقی.

فیلترهای دیجیتال از نظر پاسخ ضربه به دو دسته با پاسخ ضربه محدود FIR و نامحدود IIR تقسیم می‌شوند. فیلترهای IIR به‌طور معمول عملکرد بهتری نسبت به نوع FIR آن دارند و برای رسیدن به مشخصات یکسان، تعداد پارامترهای کمتری برای تطبیق داشته که باعث کاهش بار محاسباتی می‌شود. یک نگرانی اساسی در طراحی فیلتر IIR این است که تابع هزینه طراحی به‌صورت خطای چندسطحی در می‌آید. این اتفاق باعث می‌شود که به راحتی در بهینه محلی به دام افتد و از رسیدن آن به بهینه عمومی جلوگیری کند.

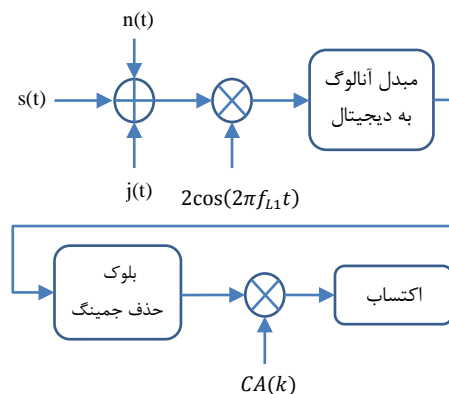
۴- الگوریتم‌های تکاملی

طی دو دهه اخیر الگوریتم‌های تکاملی به ابزاری بسیار محبوب برای جستجو، بهینه‌سازی و ارائه راه‌حل برای مسائل گوناگون تبدیل گشته است. این الگوریتم‌ها بر مبنای تعدادی اصل اساسی کار می‌کنند. به‌عنوان مثال، یک یا چند جمعیت از افراد حضور دارند و برای منابع محدودی با یکدیگر رقابت می‌کنند. جمعیت‌ها به‌طور پویا تغییر کرده و به جستجوی فضای مورد نظر برای رسیدن افراد به بهترین سازگاری می‌پردازند. الگوریتم‌های تکاملی در مقایسه با دیگر روش‌های بهینه‌سازی و جستجوی کلاسیک دارای مزایای بسیاری به شرح زیر می‌باشند [۲۰]:

۱. طبیعت موجودات زنده‌ای به‌گونه‌ای است که همواره برای حل مشکلات خود، بهترین راه‌حل را پیدا می‌کنند. ویژگی مشترک این رفتارها امکان مدل‌سازی ساده آن‌ها می‌باشد. لذا الگوریتم‌های تکاملی که از مدل‌سازی این رفتارها حاصل می‌گردند، مفهومی ساده، قابل درک و انعطاف‌پذیر دارند.
۲. این الگوریتم‌ها از اطلاعات قبلی خود استفاده می‌کنند. واضح است روشی که از اطلاعات پیشین برای حل مسأله بهره می‌برد اطلاعات کمتری نیاز داشته و همچنین فضای جستجوی محدودتری دارد.

فیلتر پایین‌گذر تنها تداخل موجود در پهنای باند این فیلتر باقی می‌ماند. اگر یک تداخل CW با فرکانس ثابت و یک سیگنال CW با فرکانس داپلر متغیر با حرکت ماهواره موجود باشد، تداخل CW به مرور بر خطوط طیف سیگنال منطبق شده که این امر موجب می‌شود تمام این خطوط بر میزان تداخل باقی‌مانده در خروجی فیلتر تأثیرگذار باشند و در نتیجه بر روی حلقه‌های کد و ردیابی اثر سو ایجاد کنند. تأثیر تداخل را می‌توان به از دست دادن ردیابی، افزایش خطاهای شبه‌فاصله، نرخ خطای بالای دمدولاسیون، عدم توانایی در ردیابی ماهواره‌ها و تشخیص سیگنال نادرست خلاصه کرد.

با توجه به مطالب بیان شده، نیاز به بلوک مقابله با جمینگ در گیرنده GPS اجتناب‌ناپذیر است. نحوه قرار گرفتن بلوک حذف جمینگ در روش‌های پیش از همبسته‌گیری در گیرنده GPS در شکل (۱) نشان داده شده است. فیلتر در نظر گرفته شده برای بلوک حذف جمینگ این مقاله، به‌دلیل سادگی محاسبات فیلتر شکاف تطبیقی می‌باشد.

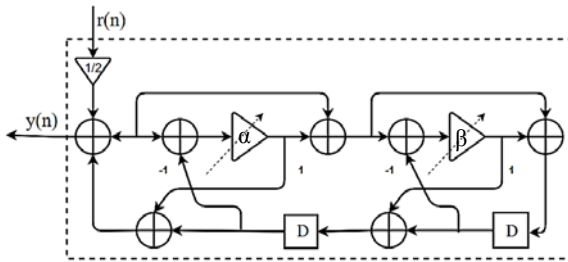


شکل (۱): بلوک دیاگرام حذف جمینگ در گیرنده GPS.

۳- فیلتر شکاف تطبیقی

برای طراحی هر فیلتر تطبیقی دو جزء اساسی ساختار ایده‌آل فیلتر و الگوریتمی برای وفق دادن ضرایب فیلتر مورد نیاز است. فیلتر شکاف یک فیلتر میان‌گذر با پهنای باند بسیار باریک می‌باشد که می‌تواند یک فرکانس خاص را شکاف داده و حذف نماید. الگوریتم تطبیقی، وزن‌های فیلتر را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که پاسخ سیستم بتواند عملکرد مورد انتظار را ارضاء نماید. بلوک دیاگرام و ساختار کلی فیلتر شکاف تطبیقی و نحوه تطبیق آن در شکل (۲) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم تطبیق با استفاده از خطای حاصل در هر تکرار ضرایب را به‌روزرسانی می‌کند [۱۹].

بیشتر می‌شود. در صورتی که ضریب α به حداکثر میزان ممکن خود یعنی یک برسد، عمق شکاف نامحدود شده و در نتیجه مقداری از اطلاعات مفید سیگنال نیز به همراه تداخل حذف می‌گردد. این اتفاق باعث خراب شدن SNR خروجی خواهد شد. بنابراین همواره باید اندازه ضریب α را نزدیک به یک نگه داشت. ضریب β نیز متناسب با فرکانس جمینگ است. بلوک دیاگرام این فیلتر شکاف در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): بلوک دیاگرام فیلتر شکاف درجه دو.

الگوریتمی که در این مقاله برای تطبیق ضرایب فیلتر مورد نظر استفاده شده، الگوریتم تکاملی PSO بوده که در سال ۱۹۹۵ معرفی گردیده است. این الگوریتم اقتباسی از رفتار هجومی پرندگانمانند، دسته کلاغ‌ها می‌باشد. به این شکل که دسته‌ای از ذرات (به‌عنوان متغیرهای بهینه‌سازی)، در محیط جستجو پخش می‌شوند. واضح است که بعضی از ذرات، موقعیت بهتری نسبت به ذرات دیگر خواهند داشت. طبق رفتار ذرات هجومی بقیه ذرات سعی می‌کنند موقعیت خود را به موقعیت ذرات برتر برسانند. در عین حال، موقعیت ذرات برتر نیز در حال تغییر می‌باشد. تغییر موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود ذره در حرکات قبلی و تجربه دیگر ذرات صورت می‌گیرد. در واقع، هر ذره از برتری یا عدم برتری خود نسبت به ذرات کل گروه آگاه است [۲۱-۲۳].

مراحلی که این الگوریتم باید طی کند تا به مقدار بهینه موردنظر برسد مطابق با فلوچارت شکل (۴) به شرح زیر است:

مرحله ۱. مقداردهی اولیه: دادن مقدار اولیه به یک جمعیت از ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی در ابعاد فضای جستجو.

مرحله ۲. تخمین: تخمین زدن شایستگی برای هر یک از ذرات موجود در جمعیت.

مرحله ۳. به‌روزرسانی: محاسبه سرعت هر ذره (V_i) و موقعیت جدید آن (X_i) در تکرار $t + 1$ با استفاده از روابط (۹) و (۱۰).

$$V_i[t + 1] = w * V_i[t] + C_1 * rand() * (Pbest_i[t] - X_i[t]) + C_2 * rand() * (Gbest[t] - X_i[t]) \quad (9)$$

$$X_i[t + 1] = X_i[t] + V_i[t + 1] \quad (10)$$

۳. برخی از روش‌های عددی تنها برای کاربردهای با متغیر پیوسته یا دیگر مجموعه‌های محدود قابل استفاده هستند، اما EA یک روش مستقل از داده است.

۴. تکامل یک فرآیند موازی است. هر ارزیابی در EA فرآیندهای موازی را ترتیب می‌دهد و تنها در طی فرآیند انتخاب نیاز به پردازش سری دارد.

۵. بهینه‌سازی با استفاده از روش‌های قدیمی به‌صورت پویا با تغییراتی که در محیط مسئله اتفاق می‌افتد، تغییر می‌کند. بنابراین این روش‌ها قوی نبوده و نیاز به راه‌اندازی مجدد برای به‌دست آوردن پاسخ دارد. این در حالی است که الگوریتم‌های تکاملی بسیار مقاوم بوده و برای تطبیق با تغییرات محیط توسعه یافته‌اند.

۶. EA توانایی خود را برای حل مسائل بدون نیاز به تخصص انسانی ثابت کرده است. با این حال، در صورت دسترسی، از تخصص انسانی نیز استفاده می‌نماید.

در کنار مزایای بسیاری که EA دارد، برخی ایرادات نیز بر آن وارد است. به‌عنوان مثال، این اطمینان را که همواره به راه‌حل بهینه برای یک مسئله خاص در زمان قابل پیش‌بینی برسد، نمی‌دهد. همچنین ممکن است نیاز به تنظیم پارامتر با استفاده از روش سعی و خطا داشته باشد [۲۰].

۵- روش پیشنهادی

ساختاری که در این مقاله برای حذف جمینگ تک فرکانس موج پیوسته در نظر گرفته شده است، استفاده از یک فیلتر شکاف تطبیقی است. بنابر آنچه بیان شد، برای داشتن فیلتر شکاف تطبیقی نیاز به انتخاب حالت ایده‌آل فیلتر شکاف و همچنین الگوریتم مناسب برای تطبیق وزن‌های فیلتر داریم. نوآوری این مقاله بهره‌گیری از یک نوع خاص الگوریتم تکاملی PSO به‌منظور تطبیق ضرایب فیلتر می‌باشد که تاکنون استفاده نشده است. بنابراین در ادامه به توصیف ساختار انتخابی فیلتر و همچنین الگوریتم تکاملی PSO پرداخته شده است.

با توجه به عملکرد بهتر فیلتر شکاف IIR، در این مقاله از این فیلتر استفاده شده است. تابع تبدیل فیلتر شکاف IIR طبق رابطه (۷) بیان شده و بنابراین لازم است دو ضریب α و β تطبیق داده شود [۳].

$$H_N(z) \triangleq \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{1 + \alpha}{2} \cdot \frac{1 - 2\beta z^{-1} + z^{-2}}{1 - \beta(1 + \alpha)z^{-1} + \alpha z^{-2}} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1 - \tan(B/2)}{1 + \tan(B/2)} \quad ; \quad \beta = \cos(\omega_N) \quad (8)$$

α متناسب با عمق شکاف و در نتیجه وابسته به توان جمینگ اعمالی است. هرچه مقدار ضریب α بیشتر باشد، عمق شکاف نیز

اگر ضرایب C_1 و C_2 ثابت و به طور معمول برابر با دو در نظر گرفته شود، الگوریتم مورد نظر SPSO نام می‌گیرد [۲۴]. اگر مقادیر این دو پارامتر یکسان و به صورت رابطه (۱۱) به دست آید، آن را TACPSO می‌نامند [۲۵].

$$C_1 = C_2 = 2.2 - \exp[-(4t/T)^2] \quad (11)$$

در یک الگوریتم PSO بهبود یافته که آن را MPSO می‌نامند، توابع در نظر گرفته شده برای محاسبه C_1 و C_2 به صورت روابط (۱۲) و (۱۳) می‌باشد [۲۶].

$$C_1 = \left(-\frac{2.05}{T}\right)t + 2.55 \quad (12)$$

$$C_2 = (1/T)t + 1.25 \quad (13)$$

الگوریتم دیگری که با تغییر در توابع محاسبه C_1 و C_2 حاصل گردیده است، الگوریتم IPSO با روابط (۱۴) و (۱۵) است [۲۷].

$$C_1 = 2.5 + 2\left(\frac{t}{T}\right)^2 - 2\left(\frac{2t}{T}\right) \quad (14)$$

$$C_2 = 0.5 - 2(t/T)^2 + 2(2t/T) \quad (15)$$

با توجه به بررسی‌های انجام شده و نتایج شبیه‌سازی‌ها، الگوریتم IPSO عملکرد بهتری داشته و احتمال به دام افتادن آن در بهینه محلی کمتر از دیگر انواع الگوریتم PSO می‌باشد. بنابراین تنها نتایج حاصل از اعمال الگوریتم IPSO اعلام گردیده است.

هدف ما، محاسبه بهینه ضرایب α و β به عنوان متغیرهای الگوریتم IPSO می‌باشد.

۶- معیار ارزیابی

برای بررسی عملکرد هر روش ضد جمنینگ، به در نظر گرفتن معیارهایی برای سنجش نیاز است. در اینجا چهار معیار مجذور مربعات خطا ($RMSE^2$)، $SNRI^1$ ، تعداد ماهواره‌های اکتساب شده و دقت موقعیت‌یابی گیرنده برای مقایسه عملکرد روش پیشنهادی و دیگر روش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است که در ادامه به اختصار معرفی می‌گردد.

۶-۱- معیار RMSE

این معیار، میزان شباهت سیگنال دیجیتال بازیابی شده با سیگنال بدون اختلال را نشان می‌دهد و به صورت رابطه (۱۶) قابل تعریف است.

$$RMSE = \sqrt{(s(k) - \hat{s}(k))^2} \quad (16)$$

² Track Access Charge

³ Modified PSO

⁴ Improved PSO

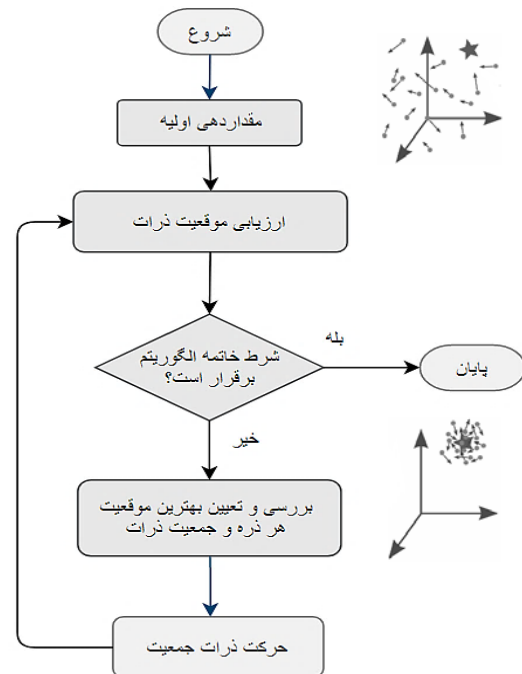
⁵ Root Mean Square of Error

⁶ Signal-to-Noise Ratio Improvement

که $Pbest_i$ بیانگر بهترین موقعیتی است که ذره i -ام در طول اجرای الگوریتم کسب کرده است. Gbest نشان‌دهنده بهترین ذره‌ای است که تا به حال داشته‌ایم و در واقع، موقعیت سرگروه را مشخص می‌کند. C_1 پارامتر شناخت فردی است که باعث می‌شود هر ذره به سمت بهترین نقطه‌ای که خود و همسایگانش پیدا کرده‌اند، حرکت نماید. C_2 نیز پارامتر شناخت اجتماعی است که هر ذره را به سمت بهترین موقعیت کسب‌شده کل ذرات، سوق می‌دهد. W (وزن اینرسی) ضریبی پویا است که از مقدار ۰٫۹ تا ۰٫۴ کاهش می‌یابد. علت کاهش W این است که دوست داریم در ابتدا الگوریتم، فضای بیشتری را مورد جستجو قرار دهد و هرچه به پایان نزدیک می‌شویم، تنوع کم شود و به سمت ناحیه بهینه تمرکز داشته باشیم.

بنابراین هر ذره باید پارامترهایی از جمله موقعیت و سرعت فعلی، فاصله خود از Gbest و $Pbest_i$ را برای جابجایی در نظر داشته باشد.

مرحله ۴. خاتمه: الگوریتم در صورت رسیدن به معیار توقف تعیین شده خاتمه می‌یابد و در غیر این صورت به مرحله دو باز می‌گردد (معیار توقف در این مقاله تعداد تکرار در نظر گرفته شده است).



شکل (۴): بلوک دیاگرام الگوریتم تکاملی PSO.

با توجه به مقدار در نظر گرفته‌شده برای ضرایب، الگوریتم PSO به انواع گوناگونی از جمله $SPSO^1$ ، $TACPSO^2$ ، $MPSO^3$ و $IPSO^4$ تقسیم می‌شود.

¹ Solid PSO

۶-۲- بهبود SNR

معیار بهبود SNR نشان‌دهنده عملکرد روش ضدجمینگ در حالت پایدار یا دائمی بوده که با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود.

$$SNRI = 10 \log \frac{E\{|r(k) - s(k)|^2\}}{E\{|r(k) - \hat{s}(k)|^2\}} \text{ (dB)} \quad (17)$$

۶-۳- تعداد ماهواره‌های اکتساب شده

آخرین پردازشی که باید در گیرنده انجام شود، محاسبه مکان دقیق کاربر است. گیرنده GPS موقعیت خود را با استفاده از زمان‌بندی دقیق سیگنال‌های فرستاده‌شده از ماهواره‌های GPS و MLP NN در بالای سطح زمین، محاسبه می‌کند. هر ماهواره به‌طور مداوم در حال ارسال پیامی با محتوای زمان ارسال پیام و موقعیت ماهواره در آن زمان است. گیرنده از پیام‌های دریافتی برای محاسبه زمان انتقال هر پیام استفاده می‌کند و سپس با استفاده از سرعت نور در فضا، فاصله گیرنده از زمین مشخص می‌گردد. فاصله محاسبه‌شده، شبه‌فاصله نام دارد. به علت خطا در ساعت گیرنده، شبه‌فاصله خطاهای زیادی دارد. از آنجا که این خطا برای همه مشاهدات یکسان است می‌توان اثر آن را از بین برد.

به‌دلیل آن‌که چهار مجهول (مکان و اختلاف زمان) داریم باید حداقل اطلاعات چهار ماهواره را در دست داشته باشیم. بنابراین روشی که برای حذف جمینگ استفاده می‌شود باید بتواند حداقل چهار ماهواره را بازیابی کند. از همین رو، ابتدایی‌ترین معیاری که باید ارضاء گردد، تعداد ماهواره اکتساب شده است [۲۸].

۶-۴- دقت موقعیت‌یابی گیرنده

با توجه به آنکه هدف گیرنده GPS مکان‌یابی کاربر است، بررسی دقت موقعیت‌یابی آن یکی از معیارهای مهم برای ارزیابی عملکرد روش ضد جمینگ است. در این مقاله، RMS خطای مکان‌یابی گیرنده در مختصات E, U و N طبق رابطه (۱۸) محاسبه شده است.

$$RMSE_{position} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - m_i)^2} \quad (18)$$

در رابطه (۱۸)، N بیانگر تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده است. p_i و m_i به ترتیب موقعیت واقعی کاربر و موقعیت تخمین زده‌شده را نشان می‌دهند.

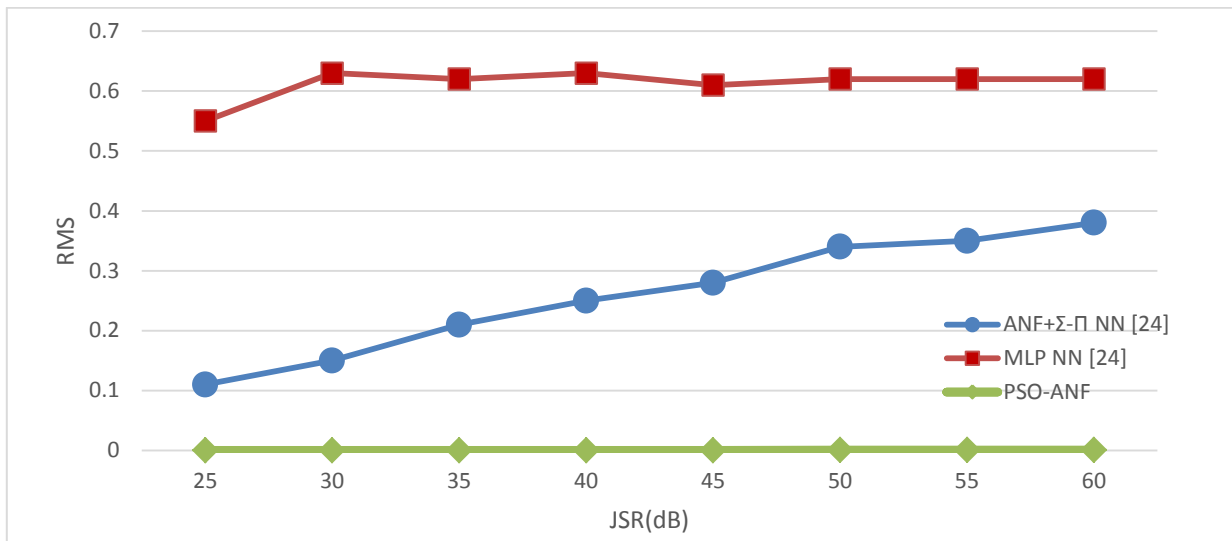
۷- تحلیل عملکرد

فرکانس IF بر روی ۱,۴۰۵ مگاهرتز ثابت شده است و فرکانس نمونه‌برداری برابر با ۵,۷۱۴ مگاهرتز در نظر گرفته شده است. سیگنال دریافتی در بازه‌ای شامل ۶۲۸۵۴ نمونه (۱۱ کد) برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. توان جمر متناسب با تولید کننده سیگنال است. بنابراین محدوده ۲۵-۶۰ dB را برای JSR بررسی شده است.

شکل (۵) نمودار RMSE تخمین را برای روش پیشنهادی و روش‌های دیگر (ANF+Σ-II NN) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش پیشنهادی با اختلاف فاحشی دارای کمترین میزان RMSE نسبت به سایر روش‌ها است و متوسط مقدار آن از ۰/۲ در روش ANF+Σ-II NN به کاهش ۰/۰۰۰۳۸۵ یافته است. از آنجا که خطای روش پیشنهادی بسیار کم و نزدیک به صفر است، مقادیر دقیق RMSE را در جدول (۱) آورده‌ایم.

جدول (۱): میزان RMS خطا الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها در حذف جمر تک فرکانس.

PSO-ANF	MLP NN [11]	ANF+Σ-II NN [11]	JSR (dB)
۰/۰۰۰۱۲۳	۰/۵۵	۰/۱۱	۲۵
۰/۰۰۰۲۰۸	۰/۶۲	۰/۱۵	۳۰
۰/۰۰۰۳۱۵	۰/۶۱	۰/۲۱	۳۵
۰/۰۰۰۳۸۳	۰/۶۳	۰/۲۵	۴۰
۰/۰۰۰۴۲۹	۰/۶۱	۰/۲۸	۴۵
۰/۰۰۰۵۰۷	۰/۶۲	۰/۳۴	۵۰
۰/۰۰۰۵۲۹	۰/۶۲	۰/۳۵	۵۵
۰/۰۰۰۵۸۹	۰/۶۲	۰,۳۸	۶۰

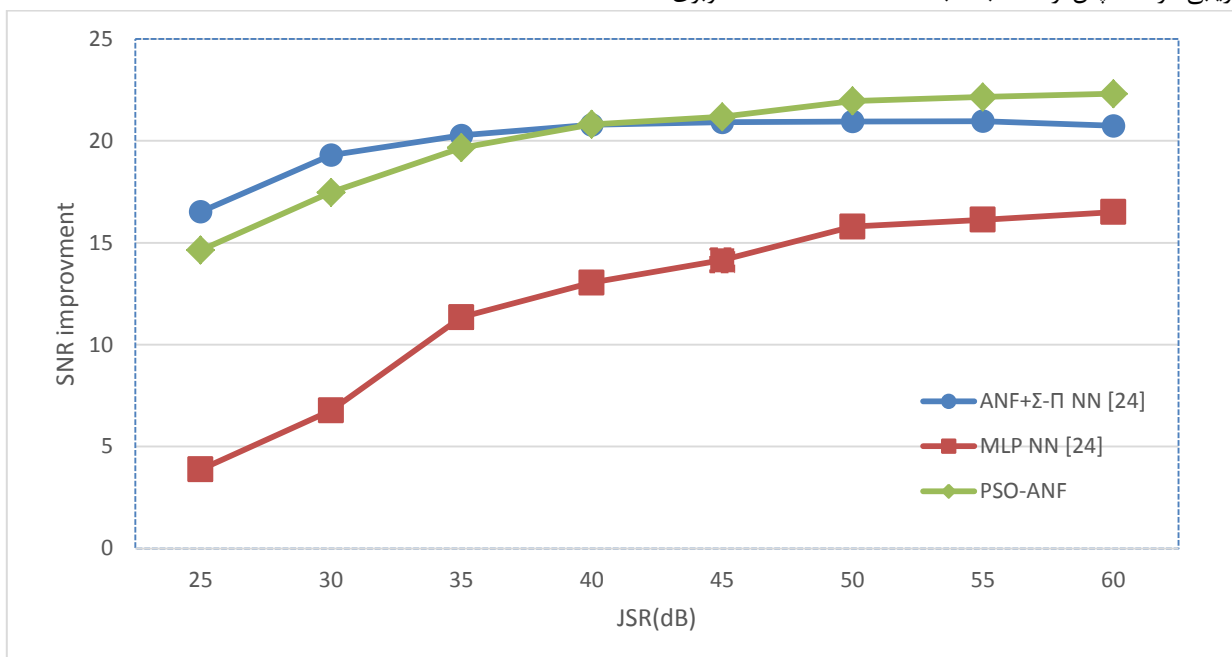


شکل (۵): نمودار میزان RMS خطا الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها در حذف جمر تک فرکانس.

قابل حل باشند. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌گردد، روش پیشنهادی تعداد ماهواره‌های بازیابی شده را در تمام بازه توان جمینگ اعمالی به شش ماهواره می‌رساند که این اتفاق منجر به افزایش دقت حل معادلات ناوبری و در نتیجه محاسبه هرچه دقیق‌تر موقعیت کاربر می‌گردد. شکل (۷) نیز نشان دهنده ماهواره‌های اکتساب شده در چهار حالت بدون اختلال بودن سیگنال، اعمال جمینگ با JSR=55 dB، استفاده از روش ANF+Σ-II NN و استفاده از روش پیشنهادی (PSO-ANF) برای حذف جمینگ است.

شکل (۶) نمودار SNRI را برای روش پیشنهادی و دیگر روش‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی با افزایش توان جممر عملکرد بهتری دارد. همچنین مقادیر دقیق SNRI را در جدول (۲) آورده‌ایم.

معیار سوم برای بررسی عملکرد سامانه ضدجمینگ تعداد ماهواره‌های اکتساب شده بعد از اعمال بلوک حذف جمینگ می‌باشد. از آنجا که معادلات ناوبری، چهار مجهولی می‌باشند، برای به دست آوردن موقعیت کاربر باید حداقل چهار ماهواره بازیابی گردد تا پس از محاسبه شبه فاصله‌ها، معادلات ناوبری



شکل (۶): نمودار میزان بهبود SNR الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها در حذف جمر تک فرکانس.

جدول (۲): میزان بهبود SNR الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها در حذف جمر تک فرکانس.

PSO-ANF	MLP NN [11]	ANF+Σ-II NN [11]	JSR (dB)
۱۴/۶۴	۳/۸۸	۱۶/۵۲	۲۵
۱۷/۴۹	۶/۷۷	۱۹/۳۰	۳۰
۱۹/۶۶	۱۱/۳۵	۲۰/۲۷	۳۵
۲۰/۶۷	۱۳/۰۴	۲۰/۷۹	۴۰
۲۱/۱۸	۱۴/۱۴	۲۰/۹۱	۴۵
۲۱/۹۶	۱۵/۷۹	۲۰/۹۵	۵۰
۲۲/۱۵	۱۶/۱۳	۲۰/۹۷	۵۵
۲۲/۳۱	۱۶/۵۱	۲۰/۷۴	۶۰

جدول (۳): تعداد ماهواره‌های مشاهده شده قبل و بعد از حذف جمر تک فرکانس به کمک روش‌های مختلف.

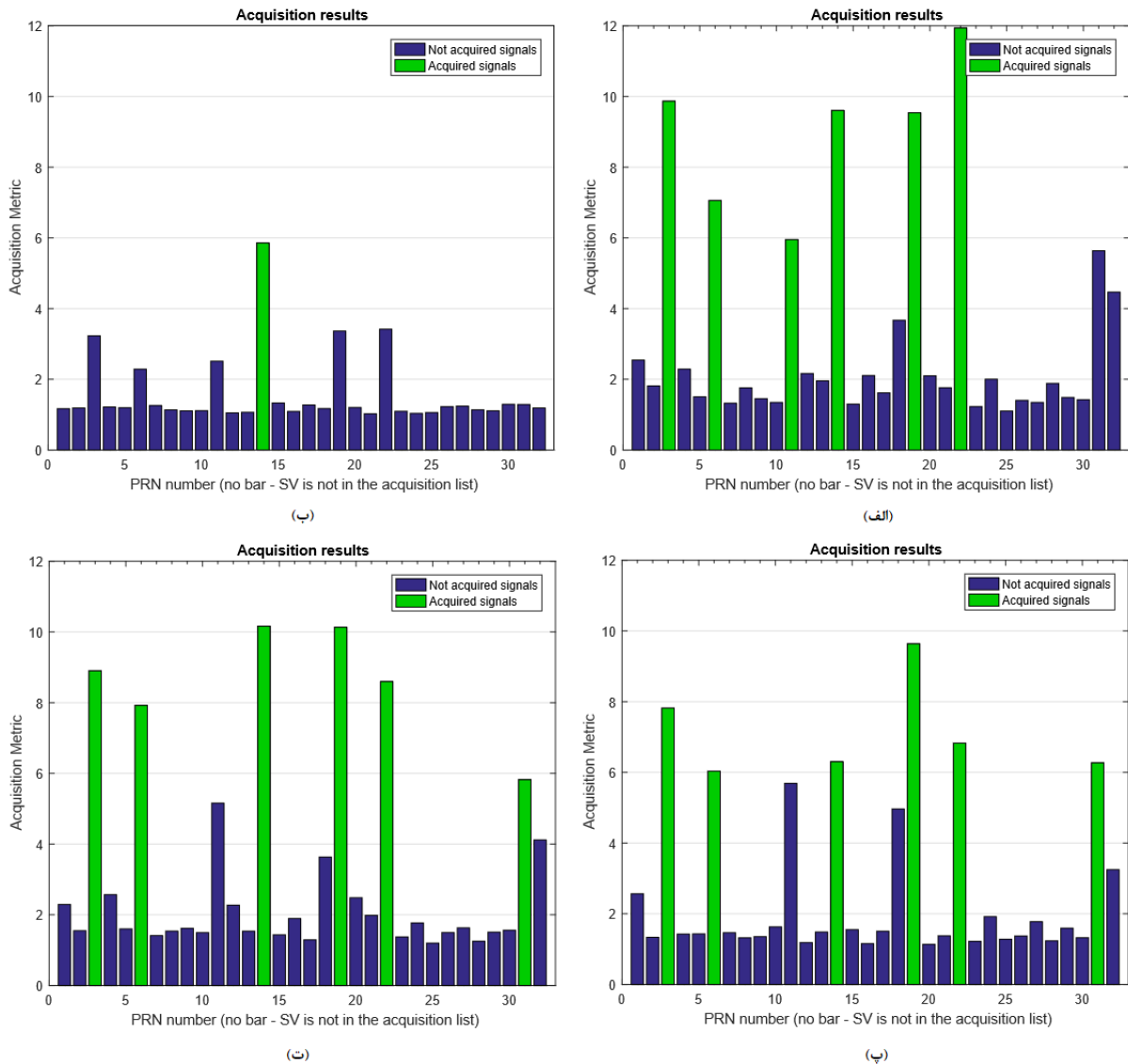
پس از حذف جمر توسط ضدجمینگ			قبل از حذف جمر	JSR (dB)
PSO-ANF	MLP NN [11]	ANF+Σ-II NN [11]		
۶	۵	۶	۵	۲۵
۶	۵	۶	۴	۳۰
۶	۶	۶	۲	۳۵
۶	۶	۶	۱	۴۰
۶	۶	۶	۱	۴۵
۶	۶	۶	۱	۵۰
۶	۵	۶	۱	۵۵
۶	۵	۶	۰	۶۰

موقعیت‌یابی برای مختصات E, N و U در جدول (۴) بیان شده است. همچنین این مقادیر با خطاهای موقعیت‌یابی دو روش مشابه دیگر روش مبتنی بر ترکیب فیلتر شکاف و شبکه عصبی (ANF+SPNN) و روشی مبتنی بر ترکیب فیلتر شکاف با فیلتر موجک ((NF+WAVELET) مقایسه شده است.

نتایج عددی به‌خوبی نشان‌دهنده عملکرد بالای روش پیشنهادی این مقاله و افزایش دقت چشمگیر موقعیت‌یابی کاربر (از چند متر به چند نانو متر) می‌باشد. همچنین مقاوم بودن روش پیشنهادی در برابر افزایش توان جمر نیز از نتایج حاصل می‌شود.

سیگنال GPS پس از عبور از بخش رهیابی و مشاهده شدن تعداد ماهواره‌های مورد نیاز وارد بخش ردیابی می‌گردد. در بخش ردیابی داده ناوبری از سیگنال دریافتی پردازش شده استخراج می‌شود و به‌عنوان ورودی به بخش حل معادلات ناوبری گیرنده داده می‌شود. در این بخش، پس از استخراج اطلاعاتی همچون موقعیت ماهواره‌ها و شبه‌فاصله، معادلات ناوبری به‌سادگی قابل حل خواهند بود و در نتیجه موقعیت کاربر به‌دست می‌آید.

از آنجا که هدف گیرنده GPS تعیین همین موقعیت کاربر است، جهت نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، خطای



شکل (۷): ماهواره‌های اکتساب شده در حالت (الف): بدون اختلال بودن سیگنال، (ب): اعمال جمینگ با $JSR = 55 \text{ dB}$ ، (پ): استفاده از روش ANF+ Σ -II NN و (ت): استفاده از روش پیشنهادی برای حذف جمینگ.

جدول (۴): میزان RMS خطای مکان‌یابی الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با سایر روش‌ها در حذف جمر تک فرکانس.

RMS خطای موقعیت روش PSO_ANF			RMS خطای موقعیت روش NF + WAVELET [29]			RMS خطای موقعیت روش ANF+ Σ -II NN [11]			JSR (dB)
U	N	E	U	N	E	U	N	E	
۵/۷۴e-۹	۴/۱۷e-۹	۳/۰۱e-۹	۴/۰۴	۹/۰۲	۷/۳۱	۶/۷۶	۲۶/۸۵	۸/۱۳	۲۵
۶/۲۲e-۹	۳/۸۹e-۹	۲/۴۶e-۹	۴/۰۴	۹/۰۲	۷/۳۱	۶/۷۶	۲۶/۸۵	۸/۱۳	۳۰
۶/۲۲e-۹	۳/۸۹e-۹	۲/۴۶e-۹	۱۱/۲۲	۱۱/۱۰	۵/۳۹	۸۴/۷۳	۶۰/۶۲	۳۴/۱۷	۳۵
۶/۲۲e-۹	۳/۸۹e-۹	۲/۴۶e-۹	۱۱/۲۲	۱۱/۱۰	۵/۳۹	۸۴/۷۳	۶۰/۶۲	۳۴/۱۷	۴۰
۶/۲۲e-۹	۳/۸۹e-۹	۲/۴۶e-۹	۱۱/۲۲	۱۱/۱۰	۵/۳۹	۸۴/۷۳	۶۰/۶۲	۳۴/۱۷	۴۵
۶/۲۲e-۹	۳/۸۹e-۹	۲/۴۶e-۹	۱۱/۰۹	۱۶/۱۳	۱۰/۲۱	۸۴/۷۳	۶۰/۶۲	۳۴/۱۷	۵۰
۶/۲۲e-۹	۳/۸۹e-۹	۲/۴۶e-۹	۱۱/۰۹	۱۶/۱۳	۱۰/۲۱	۸۴/۷۳	۶۰/۶۲	۳۴/۱۷	۵۵
۶/۲۲e-۹	۳/۸۹e-۹	۲/۴۶e-۹	۱۱/۰۹	۱۶/۱۳	۱۰/۲۱	۸۴/۷۳	۶۰/۶۲	۳۴/۱۷	۶۰

- Detection, Characterization, and Mitigation Technique for a Software-Defined Multi-GNSS Receiver,” *GPS Solutions*, vol. 22, no. 4, p. 106, 2018.
- [10] S. W. Arif, A. Coskun, and I. Kale, “A Fully Adaptive Lattice-based Notch Filter for Mitigation of Interference in GPS,” in *IEEE 15th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, pp. 217-220, 2019.
- [11] M. Mosavi and F. Shafiee, “Narrowband Interference Suppression for GPS Navigation using Neural Networks,” *GPS Solutions*, vol. 20, no. 3, pp. 341-351, 2016.
- [12] M. R. Mosavi, M. S. Moghaddasi, and M. J. Rezaei, “A New Method for Continuous Wave Interference Mitigation in Single-Frequency GPS Receivers,” *Journal of Wireless Personal Communications*, vol. 90, no. 3, pp. 1563-1578, 2016.
- [13] M. Pashaian, M. Mosavi, M. Moghaddasi, and M. Rezaei, “A Novel Interference Rejection Method for GPS Receivers,” *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 9-20, 2016.
- [14] K. Borre, D. M. Akos, N. Bertelsen, P. Rinder, and S. H. Jensen, “A Software-defined GPS and Galileo Receiver: A Single-frequency Approach,” Springer Science & Business Media, 2007.
- [15] W. L. Mao, “Novel SREKF-based Recurrent Neural Predictor for Narrowband/FM Interference Rejection in GPS,” *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 62, no. 3, pp. 216-222, 2008.
- [16] M. J. Rezaei and M. R. Mosavi, “Hybrid anti-Jamming Approach for Kinematic Global Positioning System Receivers,” *IET Signal Processing*, vol. 12, no. 7, pp. 888-895, 2018.
- [17] M. Abedi, M. J. Rezaei, and M. R. Mosavi, “Accurate Interference Mitigation in Global Positioning System Receivers based on Double-Step Short-time Fourier transform,” *Journal of Circuits, Systems, and Signal Processing*, vol. 37, no. 6, pp. 2450-2470, 2018.
- [18] A. T. Balaei, A. G. Dempster, and L. L. Presti, “Characterization of the Effects of CW and Pulse CW Interference on the GPS Signal Quality,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 45, no. 4, pp. 1418-1431, 2009.
- [19] M. A. Sharifi and H. Mojallali, “A Modified Imperialist Competitive Algorithm for Digital IIR Filter Design,” *Optik*, vol. 126, no. 21, pp. 2979-2984, 2015.
- [20] P. A. Vikhar, “Evolutionary Algorithms: A Critical Review and its Future Prospects,” in *IEEE International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*, pp. 261-265, 2016.
- [21] X. S. Shen and J. Zhang, “Improvement of PSO Algorithm Based on Brown Motion and its Applications to Adaptive Filter,” in *Advanced Materials Research, Trans. Tech. Publ.*, vol. 694, pp. 2695-2698, 2013.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله، برای کاهش تأثیر مخرب تداخل بر سیگنال GPS و حذف آن از سیگنال IF دیجیتال، از فیلتر شکاف تکاملی استفاده شده است. این فیلتر، برای تطبیق وزن‌های خود از الگوریتم IPSO بهره گرفته است.

کارایی این روش از چهار دیدگاه متفاوت RMSE، SNRI، تعداد ماهواره‌های بازیابی شده و دقت مکان‌یابی بررسی شد. نتایج عددی به دست آمده حاکی از آن است که روش پیشنهادی نه تنها حداقل تعداد ماهواره مورد نیاز را بازیابی می‌کند، بلکه با افزایش تعداد ماهواره‌های مشاهده شده در بخش رهایی موجب افزایش دقت مکان‌یابی گیرنده می‌گردد. روش پیشنهادی در مقایسه با دیگر روش‌های مشابه بیان‌شده در همه معیارها بهبود داشته است. عملکرد خوب این روش در تمام طیف توان ۲۵-۶۰ dB نشان از مقاومت آن در برابر افزایش توان جمر می‌باشد.

۹- مراجع

- [1] K. F. McDonald, P. J. Costa, and R. L. Fante, “Insights Into Jammer Mitigation via Space-Time Adaptive Processing,” in *IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium*, pp. 213-217, 2006.
- [2] F. Ye, H. Tian, and F. Che, “CW Interference Effects on the Performance of GPS Receivers,” in *IEEE Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL)*, pp. 66-72, 2017.
- [3] Y. R. Chien, “Design of GPS anti-jamming Systems using Adaptive Notch Filters,” *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 451-460, 2013.
- [4] D. Borio, C. O. Driscoll, and J. Fortuny, “Jammer Impact on Galileo and GPS Receivers,” in *IEEE International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, pp. 1-6, 2013.
- [5] D. K. Kaur and M. S. Saini, “Design IIR Notch Filter and Comb Filter to Eliminate Unwanted Frequencies for Environment,” *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, vol. 3, no. 6, pp. 1-6, 2014.
- [6] S. Mei and K. Lin, “Adaptive Notch Filter for Single and Multiple Narrow-Band Interference,” Master Science Thesis, Edith Cowan University, 2001.
- [7] L. Tan and J. Jiang, “Digital Signal Processing: Fundamentals and Applications,” Academic Press, 2018.
- [8] Q. Lv and H. Qin, “A Novel Algorithm for Adaptive Notch Filter to Detect and Mitigate the CWI for GNSS Receivers,” in *IEEE 3rd International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*, pp. 444-451, 2018.
- [9] N. G. Ferrara, M. Z. H. Bhuiyan, S. Söderholm, L. Ruotsalainen, and H. Kuusniemi, “A New Implementation of Narrowband Interference

- [26] G. Bao and K. Mao, "Particle Swarm Optimization Algorithm with Asymmetric Time Varying Acceleration Coefficients," in IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp. 2134-2139, 2009.
- [27] Z. Cui, J. Zeng, and Y. Yin, "An improved PSO with Time-varying Accelerator Coefficients," in 8th IEEE International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, vol. 2, pp. 638-643, 2008.
- [28] N. Rahemi, M. Mosavi, A. Abedi, and S. Mirzakuchaki, "Accurate solution of Navigation Equations in GPS Receivers for very High Velocities using Pseudorange Measurements," Journal of Advances in Aerospace Engineering, vol.2014, pp. 1-8, 2014.
- [29] M. J. Rezaei, M. R. Mosavi, "A New Method for Cancelling CW Jamming in GPS Receivers," Journal of Electronical & Cyber Defence, vol. 4, no. 1, pp. 69-78, 2016 (in Persian).
- [22] A. Gotmare, S. S. Bhattacharjee, R. Patidar, and N. V. George, "Swarm and Evolutionary Computing Algorithms for System Identification and Filter Design: A Comprehensive Review," Swarm and Evolutionary Computation, vol. 32, pp. 68-84, 2017.
- [23] P. Das, S. K. Naskar, S. Samanta, and S. N. Patra, "An Approach to Optimize FIR Filter Coefficients using GA, PSO, and BAT Algorithm and Their Comparative Analysis," in IEEE International Conference on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE), pp. 1-6, 2016.
- [24] R. Eberhart and J. Kennedy, "Particle Swarm Optimization," in Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [25] T. Ziyu and Z. Dingxue, "A Modified Particle Swarm Optimization with an Adaptive Acceleration Coefficients," in IEEE Asia-Pacific Conference on Information Processing, vol. 2, pp. 330-332, 2009.

Reducing Interference Effect on GPS Navigation System Using Evolutionary Notch Filter

M. Abbasi and M. R. Mosavi *

*Iran University of Science & Technology

(Received: 24/11/2019, Accepted: 01/02/2020)

ABSTRACT

As nowadays the GPS navigation system has more usage in different areas, increasing its efficiency and accuracy has gained more importance. The transmitted signal travels a long distance from the satellites to reach the receivers on the ground, so its power fades. This faded signal can easily be affected by intentional noises, the so-called jamming, or unintentional noises. One of the most destructive kinds of jamming is the continuous wave (CW) jamming. The most favored method for countering this jamming is the notch filter. Therefore, in this paper, an adaptive notch filter (ANF) with a narrow response is proposed to reduce the effects of CW jamming. A kind of PSO evolutionary algorithm called the improved particle swarm optimization algorithm (IPSO) is used to adapt the filter's coefficients according to the power and frequency of the jamming signal. Evolutionary algorithms are used in problems without any straight forward answer, and that is why we chose this method for designing the filter. It also reduces the complexity of solving such mathematical problems. Finally, the efficiency of the proposed method is compared to other similar solutions, showing a significant improvement in the similarity of recovered signal to the original signal (up to 99%), as well as an increase in the number of observed satellites up to 6, and error reduction in determining the user coordinates which is the primary goal of the GPS system.

Keywords: GPS, Jamming, Adaptive Notch Filter, Evolutionary Algorithm

* Corresponding Author Email: m_mosavi@iust.ac.ir