

## کاهش اثر تداخل در سامانه ناوبری GPS با استفاده از شبکه عصبی چندلایه

فاطمه شفیعی<sup>۱</sup>، سید محمدرضا موسوی میرکلانی<sup>۲</sup> و علی اصغر عابدی<sup>۳</sup>  
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران ۱۳۱۴-۱۶۸۴۶، ایران  
<sup>۱</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، f\_sh\_shafiee@elec.iust.ac.ir  
<sup>۲</sup>استاد، M\_Mosavi@iust.ac.ir  
<sup>۳</sup>کارشناس ارشد، aliasgharabedi@gmail.com

چکیده - در سال‌های اخیر، سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) به دلیل اطلاعات زمانی و مکانی دقیقی که ارائه می‌نماید، توجه کاربران بسیاری را در عرصه‌های صنعتی، نظامی و تجاری به خود جلب نموده است. اما به دلیل این که توان سیگنالی که به زمین می‌رسد، کمتر از سطح نویز حرارتی گیرنده است، به شدت در معرض تداخل‌های ناخواسته یا عمدی قرار می‌گیرد. به ایجاد تداخل عمدی اصطلاحاً جَمینگ می‌گویند. با وجود آن که ساختار طیف گسترده سیگنال GPS یک حفاظت ذاتی در برابر جَمینگ ایجاد می‌کند، دشمنی که درصدد از کار انداختن سیستم GPS است به سادگی می‌تواند با تولید یک سیگنال جَمینگ با توان کافی و مشخصه زمانی-فرکانسی مناسب در کارایی GPS اختلال ایجاد کند. استفاده از شبکه‌های عصبی، یک روش فیلتر کردن غیرخطی برای ردیابی و حذف تداخل می‌باشد. در این مقاله به بررسی یکی از ساختارهای شبکه‌های عصبی (پرسپترون چند لایه) و امکان حذف تداخل به کمک آن خواهیم پرداخت. در نهایت روش ارائه شده با یکی از ساختارهای موجک مقایسه خواهد شد. مشاهده می‌شود روش پیشنهادی علاوه بر شناسایی بیش از چهار ماهواره جهت حل معادلات موقعیت و مقاوم بودن در برابر افزایش توان جَمر (در بازه ۵۰ - ۲۵ dB)، نسبت به ساختار موجک حدود ۴۵ درصد بهبود در شباهت سیگنال تخمینی با سیگنال حقیقی ایجاد می‌نماید. کلید واژه‌ها- کاهش اثر جَمینگ و تداخل، سامانه ناوبری GPS، شبکه عصبی چندلایه، فیلتر کردن غیرخطی.

می‌گویند. جَمینگ، جهت‌دهی یک سیگنال الکترومغناطیسی به سمت گیرنده GPS است که گیرنده را دچار خطا می‌کند و عملکرد آن را محدود می‌نماید. در نتیجه دریافت سیگنال GPS و عملیات مسیریابی با مشکل مواجه می‌شود. جَمینگ نیز مانند تداخل به شدت مورد توجه تمام شاخه‌های خدمات نظامی قرار گرفته است. همچنین با افزایش عملیات تروریستی در جهان، جَمینگ به عنوان یک مسئله مهم کاربرد تجاری پیدا کرده است [۲].

در عملیات جَمینگ، سیگنال‌های ارسالی یا از روی سیگنال ارسال شده به گیرنده ساخته می‌شوند و یا سیگنال‌هایی مستقل از سیگنال ارسالی را تولید و می‌فرستند. از این روش برای ایجاد خطا در آشکارسازی ویژگی‌های مورد نظر از قبیل سرعت و موقعیت مکانی استفاده می‌شود و به نوعی مهم‌ترین سیستم جنگ الکترونیکی محسوب می‌گردد. جَمینگ دارای این مزیت است که خسارت فیزیکی به ماهواره یا

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم موقعیت‌یاب جهانی (GPS) برای به‌دست‌آوردن دانش جغرافیایی مکان‌ها، ارتباطات و مخابرات، اطلاعات زمانی جهت هم‌زمان سازی عملیات و بهینه کردن آرایش تجهیزات در کاربردهای نظامی و غیرنظامی افزایش یافته است [۱].

گیرنده‌های GPS در محیط‌های آرام و بدون اغتشاش از دقت خوبی برخوردارند و بسیاری از نیازهای جدید زندگی امروز را برآورده می‌سازند اما به دلیل این که توان سیگنالی که به زمین می‌رسد، حدود ۳۰-۲۰ dB کمتر از سطح نویز حرارتی گیرنده است، به شدت در معرض تداخل‌های ناخواسته (هارمونیک‌های ناشی از ایستگاه‌های انتشار امواج یا سایر منابع) یا عمدی قرار می‌گیرد. به ایجاد تداخل عمدی اصطلاحاً جَمینگ

است. پردازش فضا - زمان درجه آزادی را افزایش داده و عملکرد ضدجمینگ را به طور چشمگیری بهبود می‌بخشد [7]. هم چنین روش اخیر قابلیت حذف جمرهای چندگانه باند باریک و باند پهن را فراهم می‌کند. از این رو اغلب از این روش برای حذف جمینگ در کاربردهای نظامی استفاده می‌شود. با این وجود مشکل این پردازش از آن جا ناشی می‌شود که بردارهای وزن ابعاد بزرگی دارند و محاسبات خیلی پیچیده خواهند بود [8].

در این مقاله روشی مبتنی بر شبکه‌های عصبی برای کاهش تأثیر جمرهای پیوسته تک تون با توان‌های مختلف ارائه خواهد شد.

شبکه‌های عصبی، یک تخمین‌گر مناسب محسوب می‌شوند و یکی از شیوه‌های مورد توجه در پردازش سیگنال، شناسایی الگو، پیش‌بینی و غیره به‌شمار می‌آیند [9]. به عنوان مثالی از این کاربرد می‌توان به افزایش دقت زمانی GPS در سیستم‌های قدرت اشاره نمود [10 و 11].

پس از تخمین سیگنال به کمک شبکه‌های عصبی، می‌توان آن را از میان مجموعی از سیگنال‌ها با افزودن یک واحد تفاضلی حذف نمود. پس شبکه‌های عصبی یکی از روش‌های فیلتر کردن غیرخطی برای ردیابی و حذف تداخل نیز به‌شمار می‌آیند.

شبکه‌های پرسپترون چند لایه (MLP) یکی از انواع شبکه‌های عصبی هستند که از یک لایه ورودی، تعدادی لایه پنهان و یک لایه خروجی تشکیل شده‌اند. این شبکه‌ها را بر اساس شیوه پردازش اطلاعات در آن‌ها به دو گروه شبکه‌های جلورونده و شبکه‌های بازگشتی (که در آن‌ها از فیدبک خروجی استفاده شده)، تقسیم می‌کنند. می‌توان یک پرسپترون چند لایه را به گونه‌ای آموزش داد که بتواند هر تابع غیرخطی پیوسته را تقریب زده و پیش‌بینی نماید. این فرآیند در حالی صورت می‌گیرد که شبکه اطلاعاتی درباره توزیع ورودی‌ها نیاز ندارد. شبکه عصبی با استفاده از مجموعه‌های واقعی ورودی و خروجی، الگوریتم‌های آموزشی را به کار می‌گیرد تا ارتباطات پنهانی میان داده‌های ورودی و خروجی را از طریق ضرایب وزنی، حد آستانه‌ها و توابع اعمالی به خروجی‌های هر لایه، شکل بدهد. در واقع یک نگاشت غیرخطی بین فضای ورودی و خروجی ایجاد می‌نماید.

یک ویژگی مهم شبکه عصبی این است که پس از تعلیم، قادر به دریافت ورودی‌های دارای نویز یا ناقص نیز می‌باشد. همچنین به‌سادگی می‌توان آن را با آموزش مجدد به کمک داده‌های به‌روز شده، تغییر داد [12].

الگوریتم‌های آموزشی متنوعی جهت آموزش شبکه عصبی

گیرنده وارد نکرده و در نهایت بدون پردازش سیگنال دریافتی نمی‌توان وجود یا نبود آن را بیان کرد. بهترین اختلال هنگامی حاصل می‌گردد که جمینگ در زمان انتشار سیگنال فضایی انجام شود که مستلزم داشتن اطلاعات سیگنال و گیرنده می‌باشد.

با وجود آن که ساختار طیف گسترده سیگنال GPS یک حفاظت ذاتی در برابر جمینگ ایجاد می‌کند، دشمنی که درصدد از کار انداختن سیستم GPS است به سادگی می‌تواند با تولید یک سیگنال جمینگ با توان کافی و مشخصه زمانی - فرکانسی مناسب، کاربرد GPS را در ناحیه‌ای که مورد تهدید واقع شده، مختل کند. دلیل این مسئله واضح است: ماهواره‌های GPS یک سیگنال کم توان تولید می‌کنند که باید مسافت زیادی را تا رسیدن به گیرنده بپیماید. از طرف دیگر، یک جمر می‌تواند یک سیگنال قوی‌تر و خیلی نزدیک‌تر به گیرنده ایجاد نماید و از آنجا که توان سیگنال متناسب با مجذور مسافت پیموده شده توسط آن کاهش می‌یابد، جمر تأثیر آشکاری خواهد داشت.

روش‌های متفاوتی برای ایجاد اختلال در گیرنده GPS وجود دارد. از جمله آن‌ها می‌توان به امواج پیوسته با توان بالا، نویز جمر عمدی، فرستنده‌های رادار پهن باند، امواج پیوسته جاروب شده باند باریک، انتقال سیگنال‌های تلویزیونی و از همه مؤثرتر جمر عمدی با طیف گسترده اشاره کرد [3].

طراحی گیرنده GPS باید به گونه‌ای باشد که بتواند تأثیر تداخل عمدی یا غیرعمدی را محاسبه نماید. گیرنده‌های GPS که در کاربردهای نظامی استفاده می‌شوند، باید عملکرد قابل اعتمادی در برابر سیگنال‌های مخرب جمینگ باند باریک و باند پهن داشته باشند. زیرا اگر تداخل، توان کافی داشته باشد (طبق مرجع [4] نسبت تداخل به نویز (INR) بیش از 20 dB باشد)، گیرنده قادر به بازیابی اطلاعات ناوبری منتقل شده از طریق سیگنال GPS نخواهد بود [5].

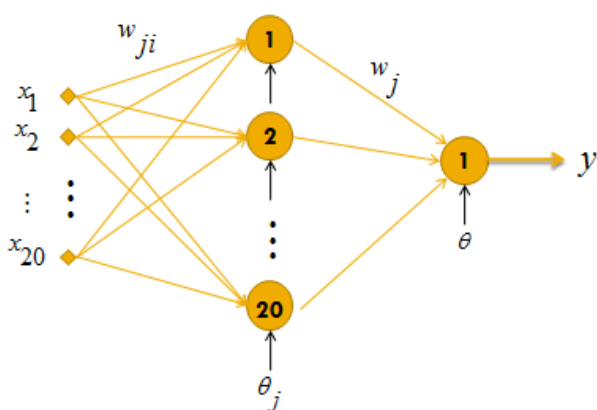
روش‌های مختلفی برای حذف جمینگ وجود دارد که شامل فیلترهای تطبیقی، روش‌های مبتنی بر آنتن و پردازش سیگنال در گیرنده می‌شود [5 و 6].

این تداخل پدید آمده را می‌توان در حوزه زمان، فرکانس، فضا و یا ترکیبی از فضا - زمان حذف نمود. پردازش زمانی ساده و کم هزینه است، اما قادر به تشخیص سیگنال‌های GPS از سیگنال‌های جمر هم فرکانس با آن نیست. پردازش فضایی می‌تواند سیگنال‌های GPS را از سیگنال‌های جمری که در همان موقعیت فضایی قرار گرفته‌اند، مجزا نماید اما مشکلات اساسی آن درجه آزادی محدود و عدم توانایی حذف تداخل‌های پهن باند

وجود ندارد که این روش کمینه مطلق را پیدا کند و لازم است متغیرها پیوسته و رابطه خطا قابل مشتق گیری باشد. از طرفی شبکه‌هایی که از یک نرون ساخته شده‌اند توانایی پیاده‌سازی توابع غیرخطی را ندارند و این مسئله یک ایراد بزرگ محسوب می‌شود. به منظور حل این مشکل و توانمندسازی شبکه‌های عصبی در حل مسائل پیچیده‌تر، دسته دیگری از شبکه‌های عصبی که به پرسپترون چندلایه یا همان MLP معروف هستند، پیشنهاد شد.

یک پرسپترون چند لایه نشان دهنده یک ارتباط غیرخطی بین بردار ورودی و بردار خروجی می‌باشد. این کار از طریق اتصال نرون‌های لایه‌های متوالی به یکدیگر، صورت می‌گیرد. خروجی نرون‌ها در ضرایب وزنی ضرب شده و به تابع غیرخطی فعال‌سازی به عنوان ورودی داده می‌شود. سپس وزن‌های شبکه به گونه‌ای تنظیم می‌گردند که خطای بین خروجی پیش بینی شده و هدف کمینه گردد (به کمک روش تعلیمی شبکه) و یا اینکه تعداد دفعات آموزش به مقدار حداکثر از پیش تعیین شده برسد.

شکل ۱ ساختار شبکه پیشنهادی را نشان می‌دهد. شبکه به صورت اتصال کامل می‌باشد، یعنی یک نرون در هر لایه از شبکه به نرون‌های لایه قبلی متصل می‌شود. سیگنال در میان شبکه از چپ به راست (به سمت جلو) و لایه به لایه جریان می‌یابد. دلیل انتخاب این ساختار با توجه به ویژگی‌های سیستم مورد بررسی در بخش بعد بیان خواهد شد.



شکل ۱: ساختار شبکه عصبی پیشنهادی برای مقابله با جمر

در الگوریتم پس انتشار در هر مرحله مقدار خروجی محاسبه شده جدید با مقدار واقعی مقایسه شده و با توجه به خطای به دست آمده وزن‌ها و حد آستانه‌های شبکه اصلاح می‌شود به

به کار گرفته شده است. از مهم‌ترین الگوریتم‌های آموزشی می‌توان به الگوریتم پس انتشار (BP) اشاره نمود.

این الگوریتم یک روش کارآمد محاسباتی برای تغییر وزن‌ها در یک شبکه جلورونده محسوب می‌شود که از توابع فعال‌سازی تفاضلی برای تعلیم یک سری آموزشی از نمونه‌های ورودی - خروجی استفاده می‌کند. الگوریتم پس انتشار جزء روش‌های جستجوی گرادیان نزولی می‌باشد [۱۳].

این مقاله به شرح زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم روش تعلیم شبکه عصبی معرفی و ساختار مناسب آن ارائه می‌گردد. در بخش سوم سیستم مورد مطالعه به جهت سیگنال‌ها بررسی و روش مقابله پیشنهاد خواهد شد. پارامترهای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی در بخش چهارم توصیف می‌شوند. در بخش پنجم نتایج شبیه سازی‌ها ارائه و در پارامتر RMS با یکی از ساختارهای مویک مقایسه می‌گردد. در نهایت نتیجه‌گیری کلی در بخش ششم به عمل آمده است.

## ۲. ساختار شبکه عصبی چندلایه و شیوه تعلیم آن

یک شبکه عصبی سیستمی است که وزن‌های اتصالات داخلی خود را مبتنی بر ارتباط ورودی - خروجی تنظیم می‌کند. یکی از مهمترین ویژگی‌های یک شبکه عصبی توانایی تعلیم آن به وسیله ارتباط متقابل با محیط پیرامونی یا یک منبع اطلاعات است. فرآیند یادگیری معمولا در یک روند تطبیقی (که به روش تعلیم شناخته می‌شود)، انجام می‌گردد [۱۴].

شبکه‌های عصبی ساختارهای متفاوتی دارند. ساده‌ترین نوع شبکه‌های عصبی، نرون خطی است که می‌توان آن را به صورت یک سیستم محرک - پاسخ در نظر گرفت. تعلیم شبکه یعنی تنظیم پارامترهای آن به نحوی که رفتار سیستم صحیح باشد. پس مجهولات همان وزن‌ها می‌باشند که در غالب حافظه‌ها عمل می‌کنند و نحوه تولید پاسخ را مشخص می‌نمایند. دو روش کلی در تعیین وزن‌ها وجود دارد: روش مستقیم (استفاده از بردار پاسخ‌های دلخواه) و روش تکرارشونده یا به عبارتی گرادیان کاهنده (GD). در روش اخیر، ابتدا مقادیر تصادفی برای وزن‌ها انتخاب می‌شود و بر اساس آن‌ها خروجی‌هایی از شبکه به دست می‌آید که در یک روال تکرار شونده مجددا محاسبه می‌گردند تا جایی که اختلاف خروجی واقعی و خروجی مطلوب کمینه شود. اما از معایب این روش آن است که ممکن است همگرا شدن به یک مقدار کمینه زمان زیادی لازم داشته باشد. همچنین اگر در سطح خطا چندین کمینه محلی وجود داشته باشد، تضمینی

همان‌طور که ملاحظه می‌شود تابع فعال‌سازی برای نرون‌های لایه مخفی تابع tansig و برای نرون خروجی تابع purelin (که حجم محاسباتی بسیار کمتری دارد)، در نظر گرفته شده است.

- **گام ششم:** به‌روز رسانی وزن‌ها و حد آستانه در نرون خروجی: در این مرحله یک تابع هزینه تعریف خواهد شد که معمولاً همان تابع خطاست و باید کمینه گردد:

$$E = \frac{1}{2} e^2; \quad e = d - Y \quad (5)$$

$$\Delta w_j = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_j} = \eta \cdot e \cdot \frac{\partial Y}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial w_j} = \eta \cdot e \cdot \sigma'_2(V) \cdot y_j \quad (6)$$

$$\Delta \theta = -\eta \frac{\partial E}{\partial \theta} = \eta \cdot e \cdot \frac{\partial Y}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta} = \eta \cdot e \cdot \sigma'_2(V) \quad (7)$$

- **گام هفتم:** به‌روز رسانی وزن‌های لایه ورودی به لایه مخفی و حد آستانه نرون‌ها در لایه مخفی:

$$\begin{aligned} \Delta w_{ji} &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} \\ &= \eta \cdot e \cdot \frac{\partial Y}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial Y_j} \cdot \frac{\partial Y_j}{\partial V_j} \cdot \frac{\partial V_j}{\partial w_{ji}} = \eta \cdot e \cdot w_j \sigma'_1(V_j) \cdot x_i \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta_j &= -\eta \frac{\partial E}{\partial \theta_j} \\ &= \eta \cdot e \cdot \frac{\partial Y}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial Y_j} \cdot \frac{\partial Y_j}{\partial V_j} \cdot \frac{\partial V_j}{\partial \theta_j} = \eta \cdot e \cdot w_j \sigma'_1(V_j) \end{aligned} \quad (9)$$

- **گام هشتم:** تکرار مراحل برای سایر الگوهای تعلیم. همان‌طور که اشاره شد گام‌های دوم تا هفتم مخصوص یک الگوی تعلیم به طول p هستند. اگر N را مبین تعداد الگوهای تعلیم در نظر بگیریم، لازم است این مراحل N مرتبه تکرار شوند تا وزن‌ها و حد آستانه‌های مطلوب حاصل گردند.

### ۳. توصیف روش مقابله با جمر پیشنهادی

شکل ۲ یک بلوک دیاگرام ساده شده از سیستم ضدجمنگ GPS را نشان می‌دهد. فرض می‌شود که سیگنال طیف گسترده دریافتی با معادله (۱۰) قابل بیان باشد:

نحوی که در انتهای هر تکرار اندازه خطای حاصل شده کمتر از میزان به‌دست آمده در تکرار قبلی باشد. اساس این کمینه‌سازی، حرکت بر روی بردار گرادیان تابع مربعات خطای شبکه می‌باشد که این بردار نیز با مشتق‌گیری زنجیره‌ای از تابع خطا نسبت به تک تک پارامترهای شبکه به‌دست می‌آید. تعلیم شبکه عصبی با الگوریتم پس انتشار را می‌توان در مراحل زیر خلاصه نمود:

- **گام اول:** مقداردهی اولیه به بردار وزن‌ها: تمامی وزن‌ها و حد آستانه‌ها با اعداد تصادفی کوچک که توزیع یکنواخت دارند؛ مقداردهی می‌شوند.
- **گام دوم:** محاسبه  $V_j$ ، که مبین سیگنال تحریک زامین نرون در لایه مخفی است:

$$V_j = \sum_{i=1}^{i=p} w_{ji} \cdot x_i + \theta_j \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $x_i$  مبین سیگنال ورودی،  $w_{ji}$  نشان دهنده وزن‌های اتصالی از لایه ورودی به لایه مخفی و  $\theta_j$  مبین حد آستانه زامین نرون در لایه مخفی می‌باشد. همچنین p بیانگر تعداد گره‌های لایه ورودی (طول یک الگوی تعلیم) بوده و در ساختار پیشنهادی برابر ۲۰ است.

- **گام سوم:** محاسبه  $Y_j$ ، که مبین خروجی زامین نرون در لایه مخفی است:

$$\begin{aligned} Y_j &= \sigma_1(V_j); \\ \sigma_1(V_j) &= \tanh(V_j) = (2 / (1 + \exp(-2V_j))) - 1 \end{aligned} \quad (2)$$

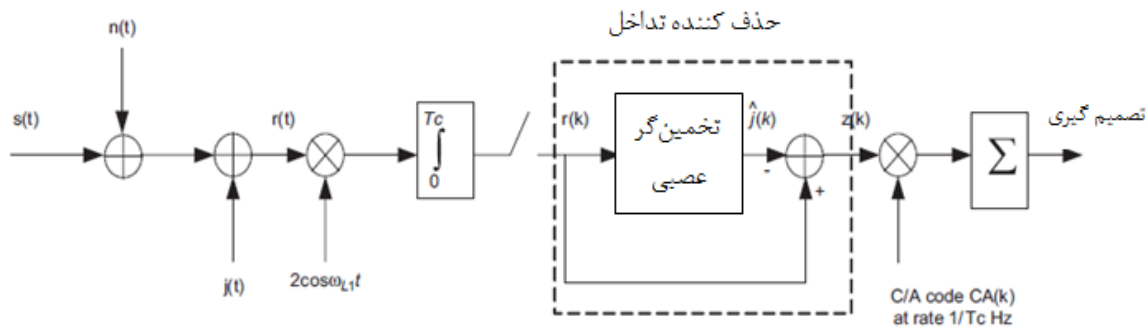
- **گام چهارم:** محاسبه  $V$ ، که مبین سیگنال تحریک نرون لایه خروجی است:

$$V = \sum_{j=1}^{j=q} w_j Y_j + \theta \quad (3)$$

در این رابطه،  $w_j$  مبین وزن‌های لایه مخفی به لایه خروجی و  $\theta$  نشان دهنده حد آستانه نرون لایه خروجی می‌باشد. همچنین q بیانگر تعداد نرون‌های لایه مخفی و در ساختار پیشنهادی برابر ۲۰ است. در این مقاله معماری شبکه را به صورت (p,q,۱) نشان می‌دهیم.

- **گام پنجم:** محاسبه  $Y$ ، که مبین خروجی نهایی سیستم (نرون لایه خروجی) است:

$$Y = \sigma_2(V); \quad \sigma_2(V) = V \quad (4)$$



شکل ۲: سیستم ضدجمینگ پیشنهادی GPS

با وجود آن که به نظر می‌رسد تداخل تک تون یکی از انواع ساده تداخل‌ها باشد، ردیابی و حذف آن همچنان مورد توجه است زیرا عملکرد سیستم GPS را به شدت تخریب می‌کند و همچنین به سادگی قابل تولید می‌باشد [۱۵].

برای آن که روش به کار رفته در حذف تداخل، قابلیت پیاده‌سازی عملی را داشته باشد از روش‌های محاسبات نرم استفاده می‌گردد که به سادگی روی یک تراشه قابل برنامه ریزی ذخیره خواهد شد. به عنوان مثال در مرجع [۱۶] به کمک یک واحد تصمیم گیری منطقی، گیرنده ای طراحی شده که بتواند سه مود کاری عملکرد عادی، ضدجمینگ و ضدفریب را یک جا (روی یک تراشه) فراهم سازد. بدیهی است گیرنده ابتدا به ردیابی سیگنال‌ها می‌پردازد و برای تعیین روش پردازشی یک پرچم برای واحد تصمیم گیری منطقی ایجاد می‌نماید. عموماً توان تداخل تک تون بیشتر از سطح نویز است. در نتیجه اگر سیگنال ورودی به حوزه فرکانس تبدیل شود، می‌توان وجود تداخل را بررسی نمود و سپس با استفاده از روش محاسباتی مناسبی آن را حذف کرد.

روندی که در ادامه بررسی می‌شود مبتنی بر این مسئله است که ردیابی سیگنال‌های طیف گسترده GPS امری دشوار می‌باشد، در حالی که عمده تداخل‌ها، از جمله تداخل تک تون می‌توانند به سادگی ردیابی و حذف شوند. تداخل  $z(k)$  به کمک شبکه عصبی تخمین زده می‌شود. با کم کردن این مقدار از شکل موج دریافتی، خروجی حذف کننده به شکل زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} z(k) &= r(k) - \hat{j}(k) \\ &= S(k) + j(k) + n(k) - \hat{j}(k) \approx S(k) + n(k) \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن  $z(k)$  بخش پهن باند سیگنال دریافتی است و می‌تواند به عنوان یک سیگنال بدون تداخل مورد توجه قرار گیرد و برای فشرده کردن وارد همبسته ساز گیرنده GPS شود [۴].

$$\begin{aligned} r(t) &= [D(t) \oplus CA(t)] \cos(\omega_{L1}t) + \sum_{k=1}^K j_k(t) + n(t) \quad (10) \\ &= S(t) + J(t) + n(t) \end{aligned}$$

که در آن  $D(t)$  مبین داده باینری با تناوب  $T$  (برابر با ۲۰ میلی ثانیه) می‌باشد.  $CA(t)$  نشان دهنده کد طلایی باینری با نرخ چپ  $1.023 \text{ MHz}$  (و در نتیجه دوره تناوبی معادل ۱ میلی ثانیه) و همچنین  $\omega_{L1} = 2\pi f_{L1}$  است که در آن  $L1$  همان فرکانس حامل و برابر  $1575.042 \text{ MHz}$  می‌باشد.  $n(t)$  نویز سفید گوسی با واریانس  $\sigma^2$  و نمایانگر سیگنال‌های جمینگ است که ممکن است عمدی یا غیرعمدی تولید شده باشند. این سه دسته سیگنال متقابلاً مستقل هستند. منابع جمینگ پهنای باندی بسیار باریک‌تر از پهنای باند سیگنال GPS ( $2.046 \text{ MHz}$ ) دارند.

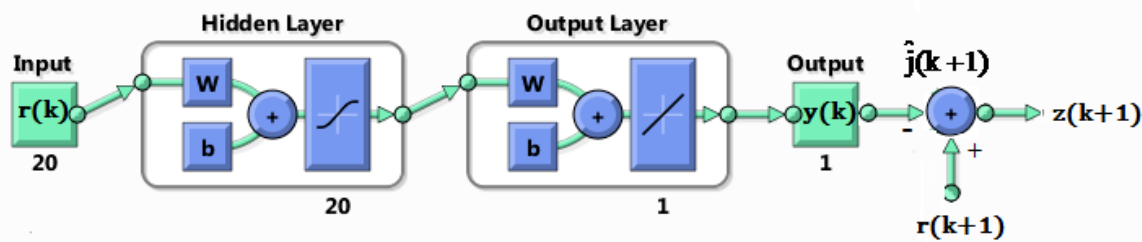
سیگنال دریافتی در باند پایه فیلتر و سپس تقویت شده است. بعد از تبدیل فرکانسی RF به IF، برای ساده سازی و تحلیل بهتر، از سیگنال با نرخ chirp نمونه برداری به عمل آمده است. نمونه  $k$  ام (که در واقع ورودی بلوک حذف کننده تداخل می‌باشد) با معادله (۱۱) قابل بیان است:

$$r(k) = S(k) + j(k) + n(k) \quad (11)$$

تداخل  $z(k)$  که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است تداخل پیوسته تک تون (CWI) می‌باشد که با رابطه (۱۲) قابل بیان است:

$$J_{cwi}(t) = J \cos[(\omega_{L1} + \omega_{\Delta})t] \quad (12)$$

که در آن  $J$  به دامنه و  $\omega_{\Delta}$  به آفست فرکانسی از فرکانس مرکزی سیگنال طیف گسترده اشاره دارد. برای نشان دادن توان جمر از فاکتور JSR (که نشان دهنده توان جمر به سیگنال است)، استفاده می‌شود.



شکل ۳: دست یابی به سیگنال بدون جمر به کمک ساختار پیشنهادی

به دلیل آنکه در اثر ایجاد اختلال، تعداد ماهواره‌های شناسایی شده به کمتر از چهار می‌رسد، گیرنده قادر به محاسبه موقعیت نخواهد شد. شکل ۴ این حالت را نمایش می‌دهد. چند معماری متفاوت برای شبکه عصبی پیشنهاد شده است که چون همه آن‌ها بیش از ۴ ماهواره را شناسایی می‌کنند (مانند شکل ۵)، به کمک متوسط مربعات خطا در روند تعلیم الگوریتم سنجیده می‌شوند. همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد در معماری پیشنهادی بیشترین دقت حاصل شده است. پارامتر دیگری که برای ارزیابی الگوریتم به کار می‌رود، معیاری برای سنجش شباهت سیگنال تخمین زده شده با سیگنال حقیقی است که آن را با رابطه (۱۴) بیان می‌نماییم:

$$RMS = \sqrt{\text{mean}(z(k) - S(k))^2} \quad (14)$$

#### ۵. نتایج شبیه سازی

شکل ۶ طیف فرکانسی سیگنال GPS را در حالت بدون تداخل نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد سیگنال از RF به IF منتقل شده است. در نتیجه اکنون فرکانس مرکزی حول ۱,۵ MHz می‌باشد. شکل‌های ۷ و ۸، به ترتیب طیف فرکانسی سیگنال آلوده شده به تداخل و سیگنال GPS که تداخل آن به کمک شبکه عصبی MLP حذف گردیده است را نشان می‌دهند. با وجود آن که طیف سیگنال اندکی تخریب شده، اما همچنان قادر به شناسایی بیش از چهار ماهواره جهت حل معادلات موقعیت می‌باشد. شکل ۹ تعداد ماهواره‌های شناسایی شده قبل و بعد از اعمال الگوریتم را متناظر با تغییر فرکانس جمر حول فرکانس مرکزی سیگنال GPS در بازه ۰,۵ تا ۲,۵ مگاهرتز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در حالات موثر جمر (نزدیک‌تر به فرکانس مرکزی)، بیشترین بهبود حاصل شده و در همه حالت‌ها بیش از چهار ماهواره شناسایی شده‌اند. در نتیجه گیرنده قادر به دریافت اطلاعات کافی برای حل معادلات موقعیت می‌باشد.

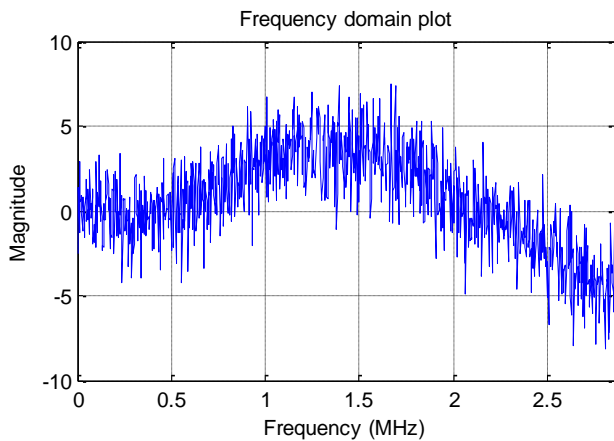
همان‌طور که اشاره شد دوره تناوب کد CA، ۱ میلی ثانیه است. فرکانس نمونه برداری داده‌های دریافتی نیز برابر ۵,۷۱۴ MHz می‌باشد. در نتیجه تعداد نمونه‌ها در هر کد ۵۷۱۴ خواهد بود که از آن‌ها برای تعلیم شبکه عصبی استفاده می‌شود. به دلیل بزرگ بودن طول داده ورودی لازم است تعداد گره‌های لایه ورودی نسبتاً بالا باشد (تا طول پنجره مشاهده، متناسب با طول داده گردد). شکل ۳ نحوه دست یابی به سیگنال بدون جمر به کمک ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد.

#### ۴. پارامترهای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی

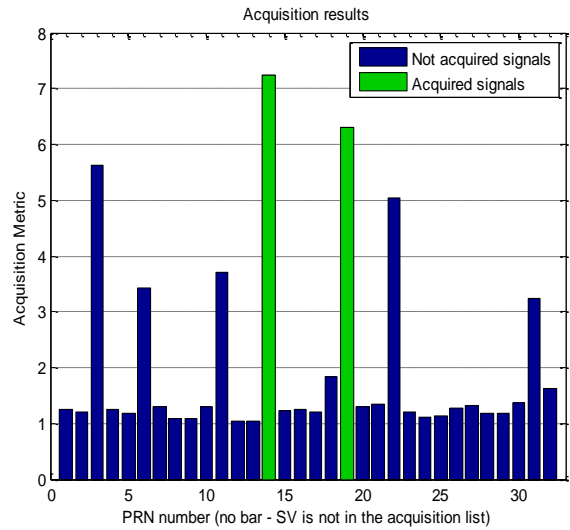
گیرنده GPS با دریافت سیگنال از ماهواره، مدت زمان حرکت آن از ماهواره تا گیرنده را به دست می‌آورد. در واقع گیرنده زمان ارسال سیگنال توسط ماهواره را با زمان دریافت آن مقایسه می‌کند. از اختلاف این دو زمان و با در دست داشتن سرعت حرکت سیگنال (برابر با سرعت نور) فاصله گیرنده از ماهواره تعیین می‌گردد. به فاصله بین ماهواره و گیرنده که به کمک اندازه گیری تأخیر در دریافت سیگنال به دست می‌آید، شبه فاصله می‌گویند زیرا خطای زمانی در هر دو ساعت گیرنده و ماهواره باعث می‌شود که فاصله اندازه‌گیری شده با فاصله واقعی بین ماهواره و گیرنده تفاوت داشته باشد.

با توجه به مشخص بودن موقعیت دقیق ماهواره‌ها می‌توان خطای ناشی از شبه فاصله را با حل حداقل چهار معادله به دست آورد. با به دست آمدن خطا، می‌توان پارامترهای موقعیت را تعیین و ساعت گیرنده را تصحیح کرد [۱۷]. برخی گیرنده‌های پیشرفته اطلاعات چندین ماهواره را هم‌زمان دریافت می‌کنند و به این ترتیب بر دقت محاسبات خود می‌افزایند.

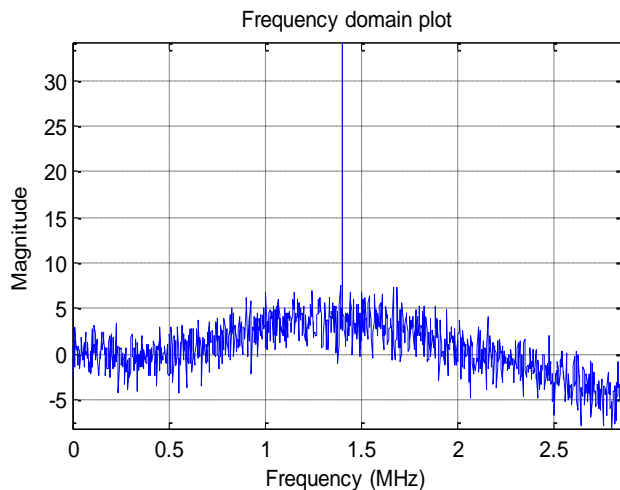
از این رو یکی از پارامترهای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، توانایی آن در افزایش تعداد ماهواره‌های شناسایی شده است. در مراجع [۱۵] و [۱۸] نیز به این مسئله به عنوان یکی از پارامترهای ارزیابی روش‌های ضدجمینگ اشاره می‌گردد.



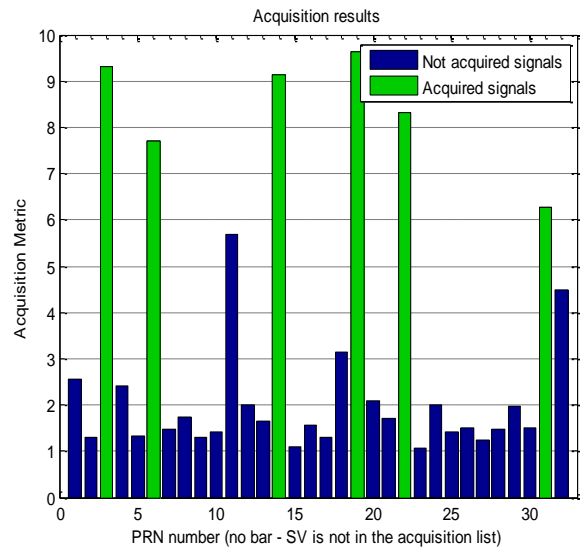
شکل ۶: طیف فرکانسی سیگنال GPS در حالت بدون تداخل



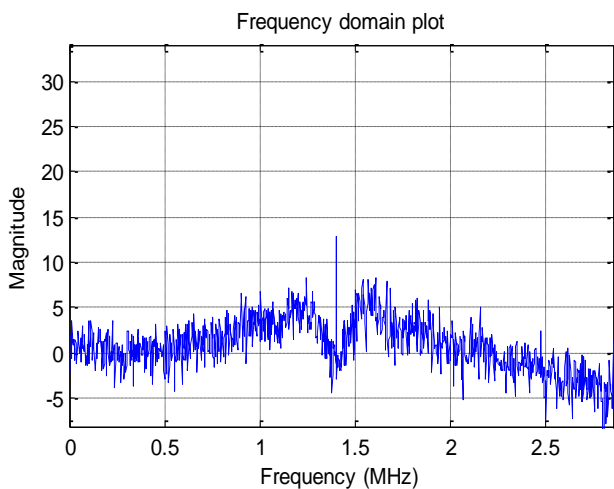
شکل ۴: ماهواره‌های شناسایی شده قبل از اعمال الگوریتم مقابله با جمر



شکل ۷: طیف فرکانسی سیگنال آلوده به تداخل



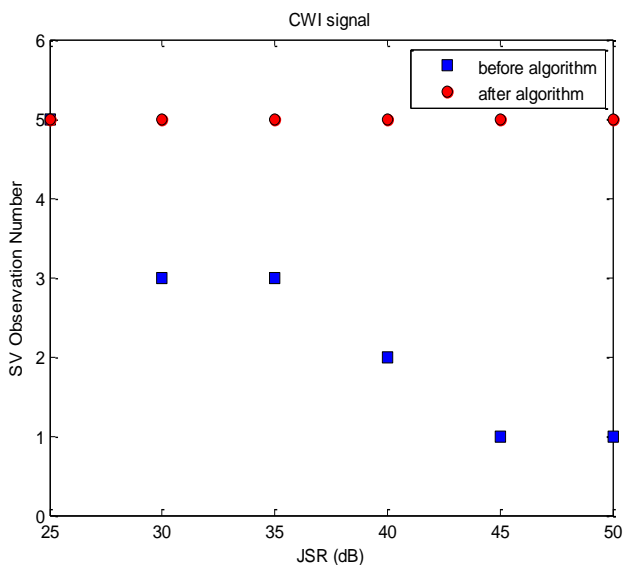
شکل ۵: ماهواره‌های شناسایی شده پس از اعمال الگوریتم با ساختار شبکه (۲۰،۲۰،۱)



شکل ۸: طیف فرکانسی سیگنال پس از کاهش اثر تداخل به کمک شبکه عصبی چندلایه

جدول ۱: مقایسه تعداد ماهواره‌های شناسایی شده و متوسط مربعات خطا برای ساختارهای مختلف

متوسط مربعات خطا (تقریبی)	تعداد ماهواره‌های شناسایی شده	ساختارهای مختلف شبکه عصبی
۰/۰۰۸	۵	(۲۰،۲۰،۱)
۰/۰۲	۵	(۱۰،۲۰،۱)
۰/۰۲	۵	(۱۰،۱۰،۱)
۰/۰۳۵	۵	(۵،۵،۱)
۰/۰۴	۵	(۵،۱۰،۵،۱)
۰/۰۴	۵	(۵،۱۰،۲۰،۱)



شکل ۱۰: ماهواره‌های شناسایی شده قبل و بعد از اعمال الگوریتم بر حسب تغییرات JSR

جدول ۲: مقادیر RMS برای توان‌های مختلف جمر

الگوریتم	۴۰ dB	۴۵ dB	۵۰ dB	۵۵ dB	۶۰ dB
WPT	۱,۱۰۵۴	۱,۱۲۴۷	۱,۱۳۲۶	۱,۱۳۴۴	۱,۱۳۵۷
MLP	۰,۶۳۲۲	۰,۶۲۴۰	۰,۶۱۹۷	۰,۶۲۳۴	۰,۶۲۲۶

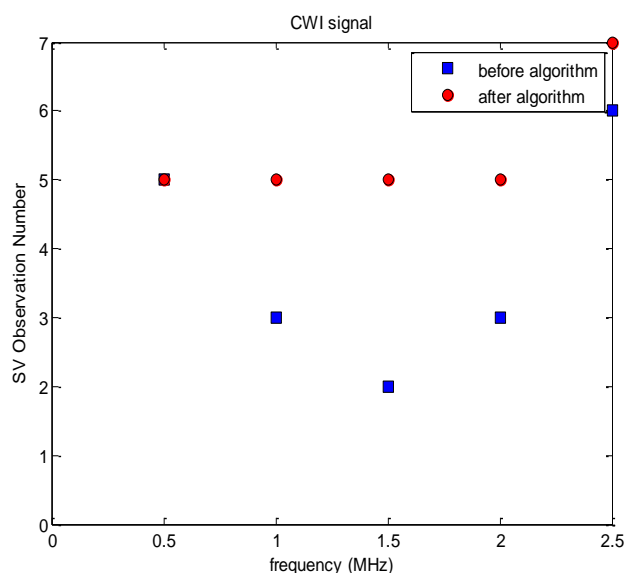
جدول ۳: بهبود مقادیر RMS در روش پیشنهادی نسبت به WPT برای توان‌های مختلف جمر

JSR	۴۰ dB	۴۵ dB	۵۰ dB	۵۵ dB	۶۰ dB
بهبود نسبی	٪۴۴,۸۹	٪۴۴,۵۱	٪۴۵,۲۸	٪۴۵,۰۴	٪۴۵,۱۷

## ۶. نتیجه گیری

توان سیگنال دریافتی GPS در سطح زمین، کمتر از سطح نویز حرارتی گیرنده است، از این رو این سیگنال به شدت در معرض تداخل‌های ناخواسته یا عمدی قرار می‌گیرد. با وجود آن‌که به نظر می‌رسد تداخل تک تون یکی از انواع ساده تداخل‌ها باشد، ردیابی و حذف آن همچنان مورد توجه است زیرا عملکرد سیستم GPS را به شدت تخریب می‌کند و همچنین به‌سادگی قابل تولید می‌باشد. در این مقاله روشی مبتنی بر شبکه عصبی MLP جهت کاهش اثر تداخل تک تون در سامانه ناوبری GPS ارائه گردید. کارایی روش مذکور به کمک تعداد ماهواره‌های شناسایی شده (در دو حالت تغییر فرکانس و تغییر دامنه جمر) و

همچنین شکل ۱۰ همین مسئله را متناظر با تغییر دامنه سیگنال (که در مقادیر JSR ظاهر می‌شود)، نشان می‌دهد. واضح است که قبل از اعمال الگوریتم با افزایش میزان JSR، خطا افزایش می‌یابد و ماهواره‌های کمتری شناسایی خواهند شد. اما استفاده از شبکه عصبی پیشنهادی، حالت یکسانی را برای همه مقادیر JSR در بازه ۵۰-۲۵ dB فراهم می‌کند که این مسئله به معنای مقاوم بودن الگوریتم در برابر افزایش توان جمر است. جدول ۲، مقدار RMS را طبق رابطه (۱۴) برای توان‌های مختلف جمر نشان می‌دهد که در تمامی حالت‌ها حداقل چهار ماهواره شناسایی شده‌اند. همچنین مقادیر RMS برای تبدیل بسته موجک (WPT) نیز در این جدول آمده است. طبق مرجع [۱۹]، الگوریتم‌های متفاوتی برای کاهش اثر تداخل مبتنی بر بسته موجک وجود دارند. در اینجا از تبدیل بسته موجک با موجک مادر Sym8 که در سطح ۵ تجزیه شده (در حالت آستانه دهی نرم)، استفاده می‌گردد (این انتخاب در مقایسه با چهار حالت دیگر برای موجک مادر صورت گرفته و به دلیل حصول بهترین نتیجه در افزایش تعداد ماهواره‌های شناسایی شده بوده است). همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد شبکه عصبی پیشنهادی نسبت به WPT به طور متوسط ۴۴,۹۸ درصد بهبود حاصل نموده است.



شکل ۹: ماهواره‌های شناسایی شده قبل و بعد از اعمال الگوریتم بر حسب تغییرات فرکانس جمر



- [16] C. L. Chang, "Novel Multiplexing Technique in Anti-Jamming GNSS Receiver", American Control Conference, pp.3453-3458, 2011.
- [17] Y. He, R. Martin and A. M. Bilgic, "Approximate Iterative Least Squares Algorithms for GPS Positioning", IEEE Conference on Signal Processing and Information Technology, pp.231-236, 2010.
- [18] R. Wu, R. Xu, D. Lu and J. Yu, "STAP Compensation Technique based on Homomorphic Filtering in GPS", IEEE Conference on Phased Array Systems and Technology, pp.841-845, 2010.
- [19] E. Pardo, M. A. Rodriguez-Hernandez and J. J. Perez-Solano, "Narrowband Interference Suppression using Undecimated Wavelet Packets in Direct-Sequence Spread-Spectrum Receivers", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol.54, No.9, pp.3648-3653, 2006.

نیز میزان مشابهت سیگنال تخمین زده شده با سیگنال ورودی بررسی شد. در پارامتر اخیر، شبکه عصبی پیشنهادی نسبت به WPT (که یکی از انواع روش‌های کاهش اثر تداخل به کمک تبدیل موجک می‌باشد)، حدود ۴۵ درصد بهبود حاصل نموده است. همچنین نتایج حاصل از اعمال الگوریتم پیشنهادی، مقاوم بودن آن در برابر افزایش توان جرم (در بازه ۵۰-۲۵ dB) و تغییرات فرکانسی و نیز توانایی شناسایی بیش از چهار ماهواره جهت حل معادلات موقعیت را نشان می‌دهد.

## مراجع

- [1] M. R. Mosavi, "Error Reduction for GPS Accurate Timing in Power Systems using Kalman Filters and Neural Networks", Journal of Electrical Review, Vol.87, No.12a, pp.161-168, 2011.
- [2] K. F. McDonald, P. J. Costa, and R. L. Fante, "Insights into Jammer Mitigation Via Space-Time Adaptive Processing", IEEE Conference on Position, Location and Navigation, pp.213-217, 2006.
- [3] A. Kundu, M. Mukhopadhyay, B. K. Sarkar and A. Chakrabarty, "Incorporation of Anti-Jamming Techniques in a GPS Receiver", IEEE Conference on Signal Processing, Communications and Networking, pp.132-137, 2008.
- [4] W. L. Mao, "Novel SREKF-based Recurrent Neural Predictor for Narrowband/FM Interference Rejection in GPS", Journal of Electronics and Communications, Vol.62, No.3, pp.216-222, 2008.
- [5] E. D. Kaplan, "Understanding GPS: Principles and Applications", Second Edition, Boston, MA: Artech House, 2006.
- [6] S. G. Carlson, C. A. Popeck and M. H. Stockmaster, "Rockwell Collins' Flexible Digital Anti-jam Architecture", ION GNSS Conference, pp.1843-1851, 2003.
- [7] D. Rowe, J. Weger and J. Walker, "Integrated GPS Anti-jam Systems", ION GNSS Conference, pp.1-7, 2005.
- [8] W. L. Mao, W. M. Wang, J. Sheen and P. H. Chen, "The UKF-based RNN Predictor for GPS Narrowband Interference Suppression", Communications Theory Workshop, pp.7-12, 2012.
- [9] مجتبی احمدی و سید محمد رضا موسوی، "حل دقیق معادلات موقعیت در گیرنده‌های GPS با استفاده از شبکه‌های عصبی"، مجله رایانش نرم و فن آوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، جلد اول، شماره اول، ص ۳۵-۴۵، ۱۳۹۱.
- [10] M. R. Mosavi, "GPS Receivers Timing Data Processing using Neural Networks: Optimal Estimation and Errors Modeling", Journal of Neural Systems, Vol.17, No.5, pp.383-393, 2007.
- [11] M. R. Mosavi, H. Nabavi and A. Nakhaei, "Neural Technologies for Precise Timing in Electric Power Systems with a Single-Frequency GPS Receiver", Journal of Wireless Personal Communications, 2013 (DOI 10.1007/s11277-013-1398-z).
- [12] M. R. Mosavi, "Wavelet Neural Network for Corrections Prediction in Single-Frequency GPS Users", Neural Processing Letters, Vol.33, No.2, pp.137-150, 2011.
- [13] H. Azami, M. R. Mosavi and S. Sanei, "Classification of GPS Satellites using Improved Back Propagation Training Algorithms", Journal of Wireless Personal Communications, Vol.71, No.2, pp.789-803, 2013.
- [14] M. R. Mosavi, "A Practical Approach for Accurate Positioning with L1 GPS Receivers using Neural Networks", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, Vol.17, No.2, pp.159-171, 2006.
- [15] S. H. Im, J. H. Song, B. H. Lee, G. I. Jee, S. Y. Han, J. S. Bae and J. O. Kim, "Anti-Jamming Technique Performance Evaluation for GPS L1 C/A Software Receiver", ION-GNSS 20th International Technical Meeting of the Satellite Division, pp.2787-2796, 2007.