Journal of Electronical & Cyber Defence
Vol. 9, No. 3, 2021, Serial No. 35

Reducing the Interference Effect on GPS Receivers Using the Multi-Correlation Architecture

S. Tohidi[1], M. R. Mosavi[2*], M. Moazedi[3]

* School of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran ,Iran

(Received: 30/10/2020, Accepted: 04/07/2021)

ABSTRACT

The use of Global Positioning System (GPS) in highly automated systems is increasing day by day. Therefore, its security of these systems is getting important more and more. The reliability of the obtained position by GPS is in danger by spoofing attacks. A spoofer transmits replicas of authentic satellite signals to force the victim receiver to misjudge the its position estimate. Numerous researches have been focused on spoofing detection and mitigation in the GPS receivers. In this paper, mitigation of spoofing attack is suggested by using multi-correlator architecture associated with neural network. Spoofing signal is generated by mixing two signals which are produced by authentic GPS signal and its shifted. The results of the simulations which was performed in the software defined receiver, indicate the solution was effective in mitigating the spoofing attack. By studying three scenarios of spoofing, the proposed method was evaluated and the results show that the rate of reduction of deception error is 88.42% by using multi-correlation architecture.

Keywords: Spoofing, GPS Receiver, Multi-correlation Architecture, Neural Network

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

نشریه علمی "پدافند الکترونیکی و سایبری"

سال نهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، ص ۵۷- ۴۹

علمی- پژوهشی

کاهش اثر تداخل در گیرنده GPS با به‌کارگیری چند همبسته‌ساز

۱- سمیرا توحیدی، ۲- سید محمدرضا موسوی میرکلائی* ۳- مریم معاضدی

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۳- استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۱۳)

چکیده

استفاده از سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS) در سامانه‌های فوق خودکار، روزبه‌روز رو به افزایش است و لذا مسئله امنیت این سامانه‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. یک خطر بزرگ در تخمین موقعیت توسط GPS، حمله فریب است. فریبنده سیگنال ماهواره را جعل می‌کند تا گیرنده را مجبور به تخمین اشتباه موقعیت نماید. تحقیقات بسیاری بر روی آشکارسازی و کاهش فریب در گیرنده GPS تمرکز دارند. در این مقاله، به‌کارگیری معماری چند همبسته‌ساز مبتنی بر شبکه عصبی جهت مقابله با حمله فریب پیشنهاد شده است. حمله فریب با سازوکار ترکیب و تأخیر بر مبنای یک سیگنال واقعی GPS ساخته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در گیرنده نرم‌افزاری، حاکی از مؤثر بودن راهکار پیشنهادی در جهت کاهش حمله فریب می‌باشد. با مورد مطالعه قرار دادن سه سناریو فریب عملی، روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصله نشان می‌دهند که میزان کاهش خطای فریب با به‌کارگیری این روش، ۸۸/۴۲٪ می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: فریب، گیرنده GPS، معماری چند همبسته‌ساز، شبکه عصبی

۱- مقدمه

سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS)[1] به‌طور گسترده‌ای به‌منظور موقعیت‌یابی و زمان‌سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سامانه در تمامی وسایل نقلیه زمینی هوایی و دریایی جهت موقعیت‌یابی و یا کمک به موقعیت‌یابی به‌کار می‌رود. بنابراین، مسئله صحت موقعیت، سرعت و یا زمان‌سنجی مبتنی بر این سامانه خیلی بیشتر حائز اهمیت می‌باشد. ازاین‌رو، در سال‌های اخیر، بیشتر تحقیقات انجام شده در زمینه موقعیت‌یابی، روی شناسایی و کاهش مداخلات این سامانه ناوبری متمرکز شده است [۳-۱]. انواع مختلفی از مداخلات وجود دارد که می‌تواند عملکرد صحیح گیرنده‌های موقعیت‌یابی را به خطر بیندازد. مراجع [۹-۴]، برخی مطالعات انجام شده در این حوزه را نشان می‌دهند.

این تحقیقات نشان می‌دهند که وضعیت گیرنده GPS غیرنظامی به‌سادگی می‌تواند توسط اختلال تحت تأثیر قرار بگیرد. درواقع، سیگنال GPS به دلیل توان کم سیگنال در معرض انواع تداخلات قرار دارد. در مورد گیرنده‌های GPS، در حال حاضر دو نوع مداخله اصلی وجود دارد: جمینگ و فریب. در جمینگ اغلب از جمر توان بالا استفاده می‌شود که معمولاً منجر به از بین رفتن قفل حلقه ردیابی و عدم موقعیت‌یابی در گیرنده هدف می‌شود. ازاین‌رو، احتمال پنهان ماندن این مداخله ضعیف است؛ اما فریب یک تداخل ساختاری است. سیگنال‌های جعلی که از طریق فریبنده ارسال می‌شوند، بسیار شبیه سیگنال‌های معتبر ارسالی از ماهواره‌ها هستند و می‌توانند به‌تدریج نتایج موقعیت‌یابی گیرنده هدف را به یک مکان کاذب القا کنند. به همین دلیل، در مقایسه با جمینگ، احتمال آشکارسازی حمله فریب[2] توسط گیرنده هدف کمتر است و ازاین‌رو خطرناک‌تر است.

حملات فریب می‌توانند ساختار ساده و یا پیچیده‌ای داشته باشند. در یکی از انواع متداول ایجاد حمله فریب، فریبنده یک تقویت‌کننده قدرت و آنتن فرستنده به یک شبیه‌ساز سیگنال ماهواره‌ای متصل می‌شود و سیگنال‌های جعلی را به سمت گیرنده هدف پخش می‌کند؛ اما این نوع فریب که دارای ساختار ساده‌ای است، معمولاً نیاز به همراه شدن با جمینگ دارد تا بتواند گیرنده هدف را تحت کنترل گیرد. در سال ۲۰۰۸، نویسندگان در مرجع [۱۰] با موفقیت یک تکرارکننده را بر اساس گیرنده نرم‌افزاری ایجاد کردند که می‌تواند گیرنده هدف را به‌صورت مستقیم در مرحله ردیابی، فریب دهد. با گسترش فریبنده‌ها، تحقیقات در مورد گیرنده‌های ضد فریب به‌سرعت شروع به توسعه کرد. در سال ۲۰۱۲، نویسندگان در مرجع [۷] یک مطالعه جامع در مورد تهدیدات فریب انجام دادند و به‌طور خلاصه روش‌های مقابله با فریب را در دو دسته اصلی معرفی کردند: تشخیص فریب و کاهش فریب. به‌طورکلی با توجه به توضیحات بیان شده در مراجع مرتبط، اقداماتی که در راستای شناسایی و کاهش فریب انجام شده است را می‌توان به چهار گروه تقسیم نمود: تشخیص

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

[1] Global Positioning System

[2] Spoofing

ناهنجاری در توان سیگنال [۱۱ و ۱۲]، تشخیص ناهنجاری در زمان ورود [۱۳ و ۱۴]، پردازش فضایی [۱۸- ۱۵] و تشخیص اعوجاج در همبستگی [۲۳- ۱۹]. در مرجع [۱۵]، نویسندگان آنتن آرایه تطبیقی را پیشنهاد کردند که از روش فرمان صفر استفاده می‌کند. این روش می‌تواند سیگنال‌های جعلی را از یک منبع مداخله محافظت نماید. مشکل اصلی این نوع روش‌ها نصب چند آنتن در گیرنده است که کاری دشوار است. با توجه به تنوع فریب، نویسندگان در مرجع [۲۴] از چندین روش ضد فریب به‌طور هم‌زمان بر روی گیرنده استفاده کرد و به‌روش کاهش فریب ساده دست یافته است. نویسندگان در مراجع [۲۵ و ۲۶]، با به‌کارگیری الگوریتم‌هایی مبتنی بر تبدیل موجک[1] در مراحل اکتساب و ردیابی اثرات مخرب حمله فریب را بر گیرنده‌های GPS کاهش دادند.

با توجه به شباهت‌های موجود بین فریب و خطای ناشی از چندمسیری[2]، امکان‌سنجی استفاده از روش‌های کاهش میزان چندمسیری برای کاهش فریب در مرجع [۲۷] مورد بررسی قرار گرفت و الگوریتم جدیدی بر اساس حداکثر درست‌نمایی برای کاهش فریب پیشنهاد داده شد. این الگوریتم بر مبنای تخمین چندمسیری که یکی از روش‌های مهم کاهش اثرات چندمسیری است، طراحی شده است. در این مقاله، از معماری چند همبسته‌ساز استفاده شده است. لذا به اطلاعات بیشتری از تابع همبستگی دسترسی داشته و از این طریق مشخصات سیگنال اصلی و سیگنال اختلال بر اساس تحلیل خروجی همبسته‌سازها و به کمک تخمین‌گر حداکثر درست‌نمایی، برآورد شده است. این روش جهت مقابله با نوعی از فریب که مستقیماً در مرحله ردیابی طراحی شده‌اند، ارائه شده است. درواقع معماری چندهمبسته‌ساز، معماری جدید است که با افزایش تعداد همبسته‌سازها در واحد ردیابی، امکان بررسی دقیق‌تر اثرات سیگنال اختلال را در این واحد گیرنده فراهم می‌آورد. این معماری در مرجع [۲۸] جهت شناسایی اختلال در سامانه ناوبری ماهواره‌ای جهانی معرفی شد.

از سوی دیگر در سال‌های اخیر محققین در این حوزه، به‌کارگیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی را در قسمت‌های مختلف گیرنده جهت آشکارسازی و مقابله با فریب معرفی نمودند. ازجمله این تحقیقات، می‌توان به مراجع [۲۹ و ۳۰] اشاره کرد که شبکه عصبی چندلایه ادراک را جهت آشکارسازی فریب به‌کار گرفتند. مرجع [۳۱] روش‌های بینایی ماشین را در این حوزه پیشنهاد نمودند. در مرجع [۳۲] تابع CAF[3] به‌عنوان یک تصویر مورد پردازش قرار گرفت و با به‌کارگیری شبکه عصبی کانولوشن، آشکارسازی اختلال فریب انجام پذیرفت.

اکنون با توجه به عملکرد موفق معماری چند همبسته‌ساز و نیز الگوریتم‌های هوش مصنوعی در حوزه شناسایی و مقابله با اختلال، نویسندگان در این مقاله تلاش می‌نمایند با به‌کارگیری معماری چند همبسته‌ساز در واحد ردیابی و بررسی خروجی این همبسته‌سازها در یک شبکه عصبی چندلایه ادراک، به مقابله با اثرات اختلال فریب در گیرنده GPS بپردازند.

ادامه مقاله در چهار بخش به بحث در این خصوص پرداخته می‌شود. در بخش ۲، طرح سامانه ارائه می‌شود. در بخش ۳، نحوه تولید سیگنال فریب شرح داده می‌شود. بخش ۴، روش پیشنهادی در این مقاله را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهد. در بخش ۵، نتایج بیان می‌شود و در قسمت پایانی نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- طرح سامانه

ماهواره‌های GPS کدها و داده‌های ناوبری را در دو محدوده فرکانسی ارسال می‌کنند: L1 و L2. تنها سیگنال L1 که برای استفاده غیرنظامی در دسترس می‌باشد، در اینجا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در حالت کلی، سیگنال دریافتی از ماهواره‌ی شماره i، در گیرنده GPS مطابق رابطه (۱) می‌باشد [۱]:

$$x(t) = S_{L1i}(t) + n(t) + I(t) = \sqrt{2p_t}\, d_{i(t)} c_{i(t)} \cos(2\pi f_{l1} t + \theta) + n(t) + I(t) \quad (۱)$$

که در آن، $S_{L1i}(t)$ مبین سیگنال ارسال شده L1، P_t مبین توان سیگنال حامل، $D_i(t)$ مبین اطلاعات ناوبری، $C_i(t)$ مبین دنباله شبه تصادفی (کد C / A) با طول چیپ T_c، f_{L1} مبین فرکانس حامل L1 (۱۵۷۵/۴۲ MHz)، n(t) مبین نویز و $I(t)$ مبین منبع تداخل در GPS هستند.

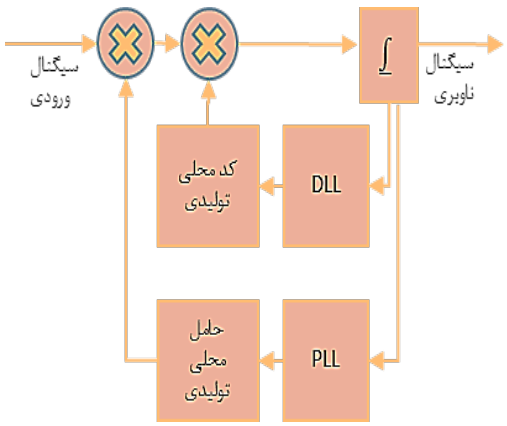
جهت بهبود آشکارسازی و مقابله با فریب شناخت اثرات فریب بر روی گیرنده GPS بسیار حائز اهمیت می‌باشد. اغلب تحقیقات بر روی تأثیر فریب بر روی شبه‌فاصله تخمین موقعیت و SNR تمرکز دارند. این معیارها نتیجه مستقیم یا غیرمستقیم رفتار حلقه‌های ردیابی گیرنده هستند. به‌منظور مطالعه جزئیات بیشتر در این مسئله، لایه پردازش سیگنال مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پس از ورود سیگنال از بخش سرجلویی به قسمت نرم‌افزاری گیرنده، فرآیند استخراج داده‌های ناوبری آغاز می‌شود. در این مسیر، نخستین گام، اکتساب ماهواره‌ها است. وظیفه واحد اکتساب پیدا کردن ماهواره‌هایی که سیگنال آن‌ها را دریافت کرده‌ایم و نیز تخمین مقدار تأخیر کد و شیفت دوپلری ایجاد شده در آن سیگنال است. مقدار تأخیر فاز کد، زمان لازم برای

[1] Wavelet Transform
[2] Multi-path
[3] Cross Ambiguity Function.

هم‌فاز نمودن کد PRN می‌باشد. تخمین تقریبی فاز کد و فرکانس حامل، به‌ترتیب، به‌منظور تولید کد PRN محلی منطبق با کد ورودی و حامل دریافتی، صورت می‌پذیرد تا در مرحله بعدی حذف گردند. سرعت ماهواره‌ها نسبت به گیرنده باعث ایجاد اثر دوپلر می‌شود که آن هم به‌نوبه خود فرکانسی بالاتر یا پایین‌تر از مقدار نامی فرکانس حامل ماهواره‌ها را نتیجه می‌دهد. در بدترین حالت، معمولاً محدوده انحراف فرکانس به اندازه ۱۰ KHz± در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین برای تولید سیگنال حامل محلی هم فرکانس با سیگنال حامل ورودی لازم است میزان انحراف فرکانس استخراج گردد.

گیرنده‌ها با تلفیق کردن سیگنال دریافتی با کد محلی و سیگنال حامل محلی، دمدولاسیون را انجام می‌دهد. به‌دلیل حرکت نسبی بین ماهواره‌ها و گیرنده، اثر دوپلر نیز باید منظور شود و کد محلی تولید شده بایستی به‌صورت پیوسته با توجه به سیگنال دریافتی تنظیم شود. گیرنده‌های سنتی GPS از دو حلقه ردیابی جهت هم‌زمان‌سازی سیگنال تولیدی محلی با سیگنال دریافتی استفاده می‌کنند. یکی برای ردیابی سیگنال حامل که معمولاً از حلقه قفل فاز [۱] (PLL) و یا حلقه قفل فرکانس [۲] (FLL) استفاده می‌شود و یکی به‌منظور ردیابی کد C/A که اغلب حلقه قفل تأخیر [۳] (DLL) به‌کار می‌رود. شکل (۱) قسمت دمدولاسیون یک گیرنده را نشان می‌دهد. نحوه عملکرد دو حلقه ردیابی شبیه هستند. آن‌ها از یک تفکیک‌کننده برای تخمین آفست بین سیگنال دریافتی و سیگنال محلی استفاده می‌کنند و یک فیلتر جهت تنظیم آن به‌کار می‌رود. این فیلتر می‌تواند با تغییر مرتبه و پهنای باند آن تنظیم شود.



شکل (۱): لایه پردازش سیگنال گیرنده GPS

تفکیک‌کننده بهینه برای PLL و FLL به‌صورت رابط (۲ و ۳) می‌باشد [۲]:

$$d_{PLL} = \arctan(\frac{Q_P}{I_P}) \qquad (۲)$$

$$d_{FLL} = \frac{\arctan 2(I_{P1}I_{P2}+Q_{P1}Q_{P2}, I_{P1}Q_{P2}-I_{P2}Q_{P1})}{t_2-t_1} \qquad (۳)$$

که در آن، Q_p قسمت موهومی و I_p قسمت حقیقی خروجی بلوک انتگرال‌گیری را نشان می‌دهند. برای محاسبه d_{FLL} دو خروجی از نمونه‌های زمانی پشت سر هم در زمان‌های t1 و t2 مورد نیاز است. تفکیک‌کننده متداول DLL تفکیک‌کننده تقدم تأخر است. برای پیاده‌سازی آن به دو کپی از کد نیاز می‌باشد. یکی تأخیر یافته و یکی پیش‌رونده است و درواقع، به میزان زمان مشخص شیفت داده شده‌اند. آفست بین سیگنال تأخر و تقدم بر حسب چیپ‌های PRN بیان می‌شود و به‌عنوان فاصله همبسته‌ساز DLL معرفی می‌گردد.

تفکیک‌کننده‌ها دو نوع می‌باشند: تفکیک‌کننده هم‌فاز یا تفکیک‌کننده غیر هم‌فاز. تفکیک‌کننده‌های نوع اول اندازه‌گیری کد را با دقت بیشتری انجام می‌دهند، اما تنها زمانی می‌توان از آن‌ها استفاده نمود که PLL روی فاز قفل شده است. تفکیک‌کننده غیر هم‌فاز به‌صورت زیر رابطه (۴) می‌باشد [۲]:

$$d_{DLL,NC} = \frac{\sqrt{I_E^2+Q_E^2}-\sqrt{I_L^2+Q_L^2}}{\sqrt{I_E^2+Q_E^2}+\sqrt{I_L^2+Q_L^2}} \qquad (۴)$$

تفکیک‌کننده هم‌فاز به‌صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود [۲]:

$$d_{DLL,C} = \frac{I_E - I_L}{4I_P} \qquad (۵)$$

سیگنال فریب دارای ساختاری مشابه با ساختار سیگنال معتبر ماهواره است، با این تفاوت که دارای شیفت زمانی $\Delta\tau_{i,c}$، شیفت دوپلر $\Delta f_{i,D}$ و نیز سطح توان متفاوت می‌باشد.

۳- نحوه تولید فریب

با گسترش ایده ذخیره‌سازی و تأخیر، به‌منظور تولید سیگنال فریب، الگوریتم تأخیر و ترکیب در گیرنده نرم‌افزاری به‌کار گرفته شده است. در حقیقت، مفهوم تأخیر و ترکیب به معنی ایجاد سیگنال فریب توسط ترکیب سیگنال حقیقی و سیگنال تأخیر یافته GPS می‌باشد. با توجه به رابطه (۱)، سیگنال در فرکانس L1 که از طریق ماهواره‌های GPS ارسال شده است با رابطه (۶) قابل بیان می‌باشد [۴].

$$S_A = A_c d_i(t) c_i(t) \cos(2\pi f_{l1} t + \varphi_{L1}) \qquad (۶)$$

[1] Phase Lock Loop
[2] Frequency Lock Loop
[3] Delay Lock Loop

این رابطه بخشی از سیگنال ماهواره‌های GPS را نشان می‌دهد که توسط گیرنده‌های غیرنظامی قابل دریافت می‌باشد. حال اگر رابطه (۶) را به‌عنوان سیگنال معتبر در نظر بگیریم، سیگنال فریب با سازوکار تأخیر و ترکیب به‌صورت رابطه (۷) نمایش داده می‌شود:

$$I_{C/A} = A_c^A d_i^A(t) c_i^A(t) \cos(2\pi f_{l1} t + \varphi_{L1}^A) + A_c^D d_i^D(t) c_i^D(t) \cos(2\pi f_{l1} t + \varphi_{L1}^D) \quad (۷)$$

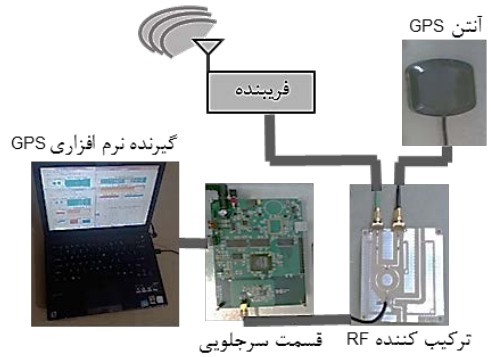
این رابطه معرف سیگنالی است که برای فریب گیرنده ارسال می‌شود. بالانویس و زیرنویس A و D به‌ترتیب بیان‌گر سیگنال معتبر و تأخیر یافته می‌باشند. برای تولید این سیگنال، ابتدا به ذخیره‌سازی سیگنال معتبر GPS نیاز است. سپس، سیگنال ذخیره شده که گویای سیگنال تأخیری است، با سیگنال حقیقی ترکیب می‌شود. بعد از تهیه سیگنال جعلی و ارسال آن به سمت گیرنده، مجموعه سیگنال دریافتی در گیرنده همانند رابطه (۸) بیان می‌شود:

$$R_{C/A} = S_{C/A}(t) + I_{C/A}(t) \quad (۸)$$

برای بی‌اثر کردن سیگنال معتبر GPS در گیرنده، می‌توان از افزایش نسبت توان سیگنال جعلی به معتبر بهره برد. برای تنظیم مناسب سطح توان سیگنال جعلی چنان‌که به‌راحتی قابل تشخیص نباشد و درعین‌حال، نسبت به سیگنال معتبر محیط مورد آزمایش قوی‌تر باشد، از تخمین‌گر توان و تنظیم‌کننده دامنه به‌ترتیب در ورودی و خروجی استفاده می‌شود. تخمین‌گر پس از دریافت سیگنال معتبر، سطح متوسط توان سیگنال را در زمان و مکان حاضر می‌سنجد. تنظیم‌کننده، دامنه سیگنال ترکیبی تولیدی را حدود ۲ dB بالاتر از سطح توان سیگنال محیط تنظیم می‌کند. با این کار، در عین حال که با حداقل توان مصرفی سیگنال معتبر GPS بی‌اثر می‌گردد، افزایش بی‌رویه توان سیگنال جعلی، موجب اتلاف توان نمی‌شود و نیز به‌راحتی توسط آشکارسازهای معمول قابل تشخیص نخواهند بود. با توجه به توضیحات بیان شده، درنهایت سیگنال دریافتی در آنتن گیرنده در شرایط حضور حمله فریب به شکل زیر اصلاح می‌شود [۴]:

$$R_{C/A} = A_c^A d_i^A(t) c_i^A(t) \cos(2\pi f_{l1} t + \varphi_{L1}^A) + A_c^D d_i^D(t) c_i^D(t) \cos(2\pi f_{l1}(t - \Delta t_D) + \varphi_{L1}^D) \quad (۹)$$

شکل (۲) نحوه جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی فریب را نمایش می‌دهد. واحد فریبنده که خود مجهز به آنتن GPS می‌باشد، داده جعلی فریب را تولید می‌نماید. سیگنال تولید شده در این واحد با سیگنال GPS دریافت شده از آنتن در واحد ترکیب‌کننده RF، ادغام شده و سپس این سیگنال ترکیبی در واحد سرجلویی دریافت می‌شود. واحد سرجلویی در گیرنده‌های GPS بعد از آنتن قرار می‌گیرند و قادر به تقویت و دریافت سیگنال GPS هستند. در نهایت، از سیگنال تولید شده نمونه‌برداری می‌شود و در گیرنده نرم‌افزاری بررسی شده و داده‌های ناوبری استخراج می‌گردند.



شکل (۲): شمای کلی رویه تولید فریب و جمع‌آوری داده‌ها.

۴- روش پیشنهادی

با مطالعه ساختار سیگنال فریب ملاحظه می‌شود که فریب و چندمسیری شباهت بسیاری دارد، چرا که سیگنال دریافتی در چندمسیری برآیند سیگنال مسیر مستقیم و سیگنال رسیده از مسیرهای غیرمستقیم می‌باشد. در واقع، هم فریب و هم چندمسیری قله‌های همبستگی سیگنال ترکیبی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اگر فرکانس حامل سیگنال جعلی از سیگنال معتبر مربوطه انحراف داشته باشد، انحراف اوج همبستگی سیگنال ترکیبی قابل تشخیص خواهد بود. اما اگر فرکانس حامل سیگنال جعلی با سیگنال معتبر مربوطه مطابقت داشته باشد، اوج همبستگی سیگنال ترکیبی فریب شبیه به چندمسیری خواهد بود که دشوارترین وضعیت برای تشخیص و کاهش فریب است. ازاین‌رو، در سناریوهای فریب شبیه‌سازی شده، فرکانس حامل سیگنال جعلی و سیگنال معتبر مربوط به آن یکسان هستند (حالت قفل فرکانس). با این وجود، سیگنال‌های جعلی که از طریق فریبنده منتقل می‌شوند و سیگنال‌های چندمسیری تفاوت قابل توجهی دارند. عمده اختلافات به شرح زیر است:

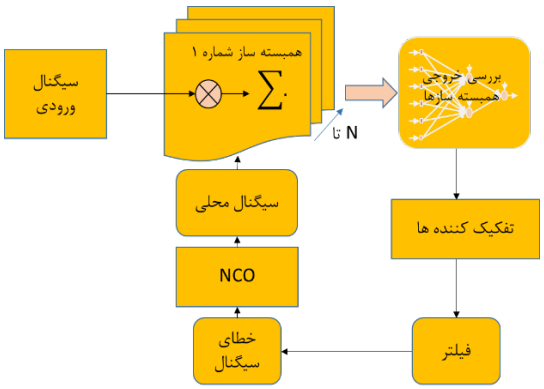
۱. به‌جز مورد خاصی که سیگنال مستقیم مسدود شده است، سیگنال‌های چندمسیری دریافتی از ماهواره به‌طور معمول ضعیف‌تر از سیگنال مستقیم آن هستند و توان پایین‌تری دارند، درحالی‌که توان سیگنال‌های جعلی مربوط به فریب، معمولاً کمی بیشتر از توان سیگنال‌های معتبر هستند.

۲. قله‌های همبستگی سیگنال‌های چندمسیره از قله همبستگی سیگنال مستقیم مربوطه عقب‌تر هستند، چراکه

سیگنال مسیر مستقیم، کوتاه‌ترین فاصله را تا رسیدن به گیرنده می‌پیماید و لذا سریع‌تر می‌رسد. فاصله بین این دو نوع قله معمولاً کاملاً نزدیک است و همپوشانی مؤثر این دو نوع قله فاصله کاملاً نزدیک را نشان می‌دهد. در مقابل، سیگنال‌های جعلی فریب می‌توانند همراه با سیگنال‌های معتبر، حتی پیش از سیگنال‌های معتبر هم‌تراز شوند. فاصله بین قله‌های همبستگی این دو نوع سیگنال ممکن است بسیار دور یا نزدیک باشد.

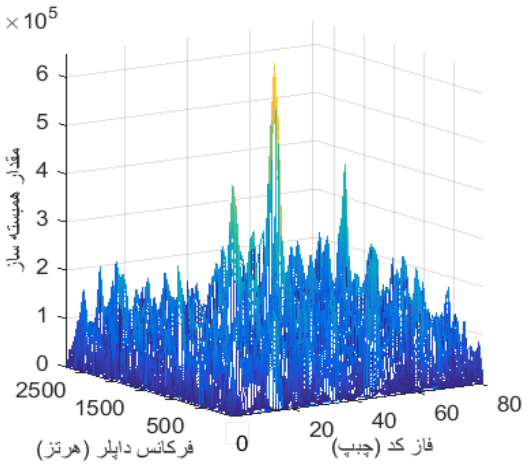
این بدان معناست که حلقه ردیابی معمول که بر اساس همبسته‌سازهای تقدم، تأخر و بلادرنگ طراحی شده است و همواره روی قله‌ای که حداکثر همبستگی را ایجاد می‌نماید، قفل می‌شود؛ به‌طور خاص برای چندمسیری طراحی شده است و نمی‌تواند به‌عنوان ضد فریب خیلی کارا باشد.

در معماری چند همبسته‌ساز با توجه به گسترش تعداد همبسته‌سازها امکان مطالعه بیشتر تابع همبستگی فراهم می‌شود و می‌توان قله‌هایی که در اثر وجود سیگنال‌هایی غیر از سیگنال اصلی در فضای همبسته‌سازها ایجاد شده‌اند را بررسی نمود. ازاین‌رو، در اینجا حلقه ردیابی با معماری چند همبسته‌ساز جهت کاهش فریب به‌کار گرفته می‌شود و از شبکه عصبی چندلایه جهت بررسی خروجی همبسته‌سازها استفاده می‌شود. شکل (۳) نمای کلی حلقه ردیابی با معماری چند همبسته‌ساز و شکل (۴) تعدد قله‌ها در فضای دو بعدی کد فاز- فرکانس دوپلر را نمایش می‌دهند. وجود بیش از یک قله با مقدار همبستگی بالا، نشان‌دهنده حضور سیگنال اختلال می‌باشند.



شکل (۳): بلوک دیاگرام حلقه ردیابی با معماری چند همبسته‌ساز مبتنی بر شبکه عصبی

تشابه موجود بین سیگنال فریب و سیگنال معتبر اغلب منجر به از دست رفتن برخی کانال‌ها در مرحله اکتساب می‌گردد. چرا که در مرحله اکتساب نقطه‌ای که حداکثر همبستگی را ایجاد می‌کند بایستی نسبت به دیگر قله‌های موجود در فضای همبستگی از مقدار حد آستانه اکتساب بالاتر باشد و وجود هم‌زمان سیگنال معتبر و سیگنال فریب این دو قله را به هم نزدیک می‌گرداند و درنتیجه نسبت آن‌ها کم می‌شود و گاهی کمتر از حد آستانه اکتساب می‌شود. درنتیجه، کانال مورد نظر از دست می‌رود و همین موجب ایجاد خطا در موقعیت‌یابی می‌شود. در اینجا به‌منظور مقابله با این مشکل، در حلقه ردیابی همه کانال‌هایی که قبل از وقوع حمله فریب در دسترس بوده‌اند، ردیابی می‌شوند.

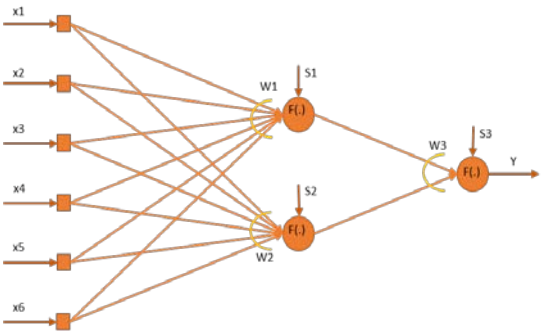


شکل (۴): نمایی از فضای همبسته‌سازها.

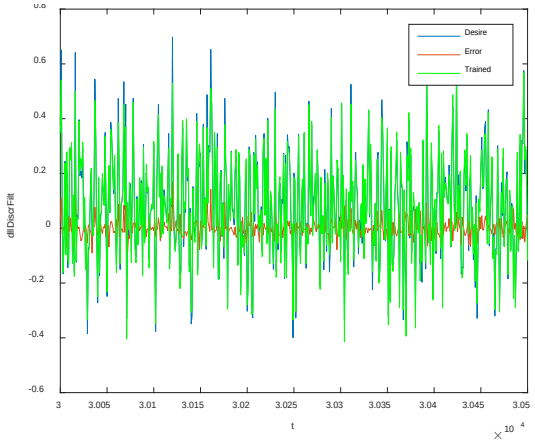
همان‌طور که در بالا بیان شد، در اینجا حملات فریب هم فرکانس طراحی شده‌اند. بنابراین، جهت ردیابی کانال‌های از دست رفته، مولد فرکانس حامل به‌منظور تولید سیگنال محلی مناسب، بر روی فرکانس حامل سیگنال دریافتی قبل از رخداد فریب، تنظیم می‌شود.

با گسترش تعداد همبسته‌سازها در بعد فاز کد، قله‌هایی که در اثر سیگنال فریب در تابع همبستگی ایجاد شده‌اند، قابل مشاهده خواهند شد. در ادامه، خروجی همبسته‌سازها در یک شبکه عصبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با انتخاب شاخه‌هایی از همبسته‌سازها که مقدار خروجی آن‌ها از حد آستانه بالاتر بوده و بررسی آن در شبکه عصبی مقدار مناسب تأخیر کد جهت تولید سیگنال محلی مناسب، به DLL ارسال می‌شود.

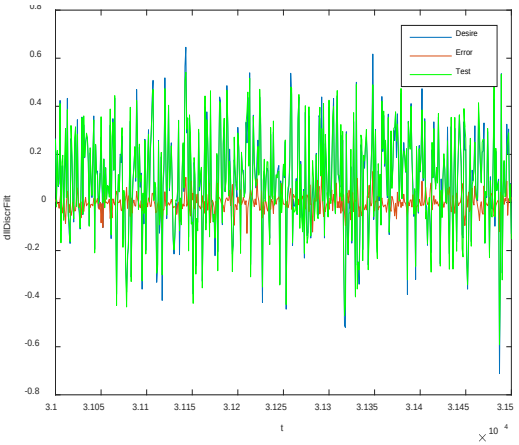
در اینجا ۱۸ شاخه همبستگی در نظر گرفته شده که ۶ شاخه به‌عنوان ورودی شبکه عصبی انتخاب می‌شود. شبکه عصبی سه لایه ادراک با معماری (۶- ۳- ۱) برای این کار طراحی شده است. با بررسی توابع مختلف سیگموید، تانژانت هایپربولیک، تانژانت هایپربولیک معکوس و تابع موجک به‌عنوان توابع فعال‌سازی در شبکه موردنظر، نهایتاً با به‌کارگیری تابع موجک به نتایج مطلوب رسیدیم و این تابع به‌عنوان تابع فعال‌سازی لایه پنهان و خروجی انتخاب شد.



شکل (۵): بلوک دیاگرام شبکه عصبی سه لایه ادراک



شکل (۶): نتیجه محاسبه خطای DLL توسط شبکه عصبی در فاز آموزش



شکل (۷): نتیجه محاسبه خطای DLL توسط شبکه عصبی در فاز آزمون

۵- نتایج

برای ارزیابی روش پیشنهادی ابتدا شبکه عصبی موردنظر با داده‌های بدون اختلال آموزش یافته و پس از تعیین ضرایب شبکه، شبکه عصبی در حلقه ردیابی گیرنده قرار گرفت. شکل (۶) نتیجه محاسبه خطای DLL توسط شبکه عصبی در فاز آموزش و شکل (۷) نتیجه محاسبه خطای DLL توسط شبکه عصبی در فاز آزمون را نشان می‌دهند.

در ادامه، با اعمال داده‌های تولید شده در ۳ سناریو فریب به گیرنده، دقت مکان‌یابی آن اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول (۱) ثبت شده‌است. این نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهادی به‌صورت میانگین ۸۸/۴۲٪ در کاهش خطای ایجاد شده در موقعیت گیرنده مؤثر بوده است. در ادامه، میزان کاهش فریب بدست آمده بر اساس الگوریتم پیشنهادی در این مقاله با روش‌های بیان شده در مراجع [۳] و [۱۲] مقایسه شد. همان‌طور که در جدول (۲) ملاحظه می‌شود، الگوریتم پیشنهادی نسبت به نتایج اعلام شده در مرجع [۳]، ۱۸ درصد و نسبت به نتایج اعلام شده در مرجع [۱۲]، ۱۴ درصد بهبود داشته است.

درازای دقت بالاتری که در الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است، پیچیدگی محاسباتی در بلوک ردیابی گیرنده افزایش یافته است. در واحد ردیابی گیرنده GPS، اندازه بردار سیگنال ورودی وابسته به زمان انتگرال‌گیری همدوس و فرکانس نمونه برداری می‌باشد که اندازه بردار ورودی در این مقاله به‌ازای فرکانس نمونه برداری ۵/۷۱۴۳ MHz و زمان انتگرال‌گیری همدوس ۱ ms، ۵۷۱۴ است. جهت سنجش میزان همبستگی این سیگنال با سیگنال محلی ۵۷۱۴ عمل ضرب و ۵۷۱۳ عمل جمع مورد نیاز است؛ بنابراین، میزان پیچیدگی محاسبه همبستگی در یک شاخه همبسته‌ساز ۱۱۴۲۷ می‌باشد و در گیرنده معمول با ۶ شاخه همبسته‌ساز این مقدار ۶۸۵۶۲ است. میزان پیچیدگی در شبکه عصبی سه لایه بیان شده، با فرض محاسبه توابع فعال‌ساز تا ۷ جمله بسط تیلور، ۷۷ است که در مقابل پیچیدگی قسمت همبسته‌سازها، صرفه‌نظر می‌شود. بنابراین، میزان پیچیدگی الگوریتم پیشنهادی به میزان تعداد همبسته‌سازهای به‌کار گرفته شده، افزایش می‌یابد. لذا، در نهایت پیچیدگی این الگوریتم ۲۰۵۶۸۶ می‌باشد.

درواقع، هزینه محاسباتی این طرح به دلیل اضافه نمودن تعداد همبسته‌سازها افزایش می‌یابد که در گیرنده نرم‌افزاری موجب افزایش زمان ردیابی خواهد شد. در اینجا، افزایش تعداد همبسته‌سازها از ۶ به ۱۸ عدد موجب افزایش زمان ردیابی از s ۱۸۱/۸۷ به s ۲۵۸/۰۸ در هر کانال شد که افزایش ٪۴۱/۳۵ را نشان می‌دهد. این نتایج در گیرنده نرم‌افزاری بر پایه نرم‌افزار Matlab در کامپیوتری با قدرت پردازنده GHz ۲/۵ که دارای حافظه داده با ظرفیت GBytes ۶ می‌باشد، به‌دست آمده است.

در پایان، به‌منظور صحت‌سنجی دقیق‌تر، روش پیشنهادی با دیگر روش‌های معمول در موضوع آشکارسازی و مقابله با فریب مورد مقایسه کیفی قرار گرفت که نتایج آن در جدول (۳) ملاحظه می‌گردد.

جدول (۱): نتایج حاصل از اعمال الگوریتم مقابله با فریب.

پایگاه داده‌ها	قبل از اعمال الگوریتم پیشنهادی				بعد از اعمال الگوریتم پیشنهادی				درصد کاهش فریب
	X(m)	Y(m)	Z(m)	RMS(m)	X(m)	Y(m)	Z(m)	RMS(m)	
مجموعه داده اول	۳۲۳۵۵۳ ۷۸/۳	۴۰۵۳۴۶ ۶۵/۴	۳۷۰۳۷۰ ۹۹/۶	۷۸۰/۱۴	۳۲۳۴۹۷ ۱۷/۹	۴۰۵۳۰۶ ۹۵/۴	۳۷۰۳۵ ۵۵/۱۸	۸۰/۹۱	۸۹/۶۲
مجموعه داده دوم	۳۲۳۵۵۱ ۹۲/۵	۴۰۵۳۴۵ ۰۶/۲	۳۷۰۳۷۰ ۱۸/۱	۷۵۷/۵۸	۳۲۳۴۹۰ ۶۹/۴	۴۰۵۲۹۹ ۲۱/۴	۳۷۰۳۴۶ ۷۵/۹	۴۵/۴۳	۹۴/۰۰
مجموعه داده سوم	۳۲۳۵۲۵ ۹۷/۲	۴۰۵۳۲۶ ۵۹/۹	۳۷۰۳۵۹ ۶۹/۸	۴۲۱/۸۵	۳۲۳۴۹۸ ۳۹/۰	۴۰۵۳۰۶ ۵۷/۰	۳۷۰۳۵۱ ۸۱/۵	۷۷/۴۱	۸۱/۶۴

جدول (۲): مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها.

روش کاهش فریب	درصد کاهش فریب	محل اعمال الگوریتم
روش نیلسون [۱۲]	٪۷۴	اکتساب و ردیابی
روش تیموری [۳]	٪۷۰	ناوبری
روش پیشنهادی	٪۸۸	ردیابی

جدول (۳): مقایسه کیفی روش پیشنهادی با سایر روش‌ها.

روش کار	محدودیت	مزیت	تجهیزات مورد نیاز	معیار	آشکارسازی	مقابله
نظارت بر توان	محدوده بزرگ عدم کارایی	تشخیص آسان و پیچیدگی کم	ارتقاء نرم‌افزاری و سخت افزاری	توان سیگنال	بلی	خیر
نظارت بر همبستگی	عدم کارایی در حضور چند مسیری	تشخیص آسان	ارتقاء نرم‌افزاری	شاخه‌های همبسته‌ساز	بلی	خیر
نظارت بر زمان ورود	تشخیص پس از تسلط فریبنده و قابلیت پیش‌بینی بیت‌ها توسط فریبنده	تشخیص آسان	ارتقاء نرم‌افزاری	داده‌های ناوبری	بلی	خیر
پردازش فضایی	عدم کارایی در حملات پیچیده	قابلیت اطمینان بالا	ارتقاء نرم‌افزاری و سخت افزاری	سیگنال IF	بلی	بلی
روش مبتنی بر موجک	عدم کارایی در حملات هماهنگ نشده	پیاده سازی آسان	ارتقاء نرم‌افزاری	تابع اکتساب	خیر	بلی
روش پیشنهادی	غیر قابل اطمینان در حملات پیچیده با توان تطبیق یافته	قابلیت اطمینان بالا	ارتقاء نرم‌افزاری	شاخه‌همبسته ساز	بلی	بلی

۶- نتیجه‌گیری

در حمله فریب، سیگنال اختلال با ساختاری مشابه سیگنال اصلی GPS منتشر می‌شود. حضور این سیگنال مؤثر بر مقادیر تابع همبستگی اندازه‌گیری شده در گیرنده خواهد بود و موجب افزایش تعداد قله‌های ایجاد شده در فضای همبستگی خواهد شد. لذا با افزایش تعداد همبسته‌سازها در حلقه ردیابی امکان بررسی بیشتر تابع همبستگی فراهم می‌شود. در این مقاله، با تلفیق معماری چند همبسته‌ساز و شبکه عصبی ادراک سه لایه (۶- ۳- ۱) خروجی همبسته‌سازها بررسی شده و میزان خطای DLL تصحیح می‌شود. عملکرد الگوریتم پیشنهادی در سه سناریو فریب ارزیابی شد که نتایج حاکی از کاهش ٪۸۸/۴۲ خطای ناشی از فریب می‌باشد.

۷- مراجع

[1] K. D. Wesson, J. N. Gross, T. E. Humphreys and B. L. Evans, "GNSS Signal Authentication Via Power and Distortion Monitoring, " in IEEE Trans Aerosp Electron Syst, vol. 54, no. 2, pp. 739-754, April 2018.

[2] M. Moazedi, M. R. Mosavi, and A. Sadr, "Real-time interference detection in tracking loop of GPS receiver," Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 13, no. 2, pp. 194-204, 2017.

[3] P. Teymouri, M. Mosavi, and M. Moazedi, "Delay Spoofing Reduction in GPS Navigation System based on Time and Transform Domain Adaptive Filtering," Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol. 14, no. 3, pp. 222-235, 2018.

[4] M. R. Mosavi, M. Moazedi, M. J. Rezaei, and A. tabatabaei, "Interference Mitigation in GPS Receivers," Iran University of Science and Technology Publications, 2015.

[5] M. Moazedi, M. Mosavi, Z. Nasrpooya, and A. Sadr, "GPS Spoofing Mitigation using Adaptive Estimator in Tracking Loop," Journal of Electronical & Cyber Defence, vol. 6, no. 3, 2018. (In Persian)

[6] F. Dovis, "GNSS Interference Threats and Countermeasures," Artech House, 2015.

[7] A. Jafarnia-Jahromi, A. Broumandan, J. Nielsen, and G. Lachapelle, "GPS Vulnerability to Spoofing Threats and a Review of Antispoofing Techniques," Int. J. Navig. Obs., vol. 2012, 2012.

[8] D. Borio, F. Dovis, H. Kuusniemi, and L. L. Presti, "Impact and Detection of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers," Proc. IEEE, vol. 104, no. 6, pp. 1233-1245, 2016.

[9] B. Xu, Q. Jia, and L. T. Hsu, "Vector Tracking Loop-Based GNSS NLOS Detection and Correction: Algorithm Design and Performance Analysis," IEEE Trans Instrum Meas, vol. 69, no. 7, pp. 4604-4619, 2019.

[10] T. E. Humphreys, B. M. Ledvina, M. L. Psiaki, B. W. O'Hanlon, and P. M. Kintner, "Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer," in Radionavigation Laboratory Conference Proceedings, 2008.

[11] A. Jafarnia Jahromi, A. Broumandan, J. Nielsen, and G. Lachapelle, "GPS Spoofer Countermeasure Effectiveness Based on Signal Strength, Noise Power and C/N0 Measurements," Int. J. Satell. Commun. Netw, vol. 30, no. 4, pp. 181-191, 2012.

[12] J. Nielsen, V. Dehghanian, and G. Lachapelle, "Efectiveness of GNSS Spoofng Countermeasure Based on Receiver CNR Measurements," Int. J. Navig. Obs., vol. 2012, pp. 1-9, 2012.

[13] S. Lo, D. De Lorenzo, P. Enge, D. Akos, and P. Bradley, "Signal Authentication: A secure Civil GNSS for Today," Inside GNSS, vol. 4, no. 5, pp. 30-39, 2009.

[14] S. C. Lo and P. K. Enge, "Authenticating Aviation Augmentation System Broadcasts," in IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Indian Wells, CA, 2010.

[15] S. Daneshmand, A. Jafarnia-Jahromi, A. Broumandan, and G. Lachapelle, "A low-Complexity GPS Anti-Spoofing Method Using a Multi-Antenna Array," Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012), pp. 1233-1243, 2012.

[16] J. Nielsen, A. Broumandan, and G. Lachapelle, "GNSS Spoofing Detection for Single Antenna Handheld Receivers," Navigation, vol. 58, no. 4, pp. 335-344, 2011.

[17] J. Nielsen, A. Broumandan, and G. Lachapelle, "Spoofing Detection and Mitigation with a Moving Handheld Receiver," GPS world, vol. 21, no. 9, pp. 27-33, 2010.

[18] P. Y. Montgomery, "Receiver-Autonomous Spoofing Detection: Experimental Results of a Multi-Antenna Receiver Defense against a Portable Civil GPS Spoofer," in Radionavigation Laboratory Conference Proceedings, 2011.

[19] K. D. Wesson, D. P. Shepard, J. A. Bhatti, and T. E. Humphreys, "An Evaluation of the Vestigial Signal Defense for Civil GPS Anti-Spoofing," in Radionavigation Laboratory Conference Proceedings, 2011.

[20] P. Daniel and E. Todd, "Characterization of Receiver Response to Spoofing Attacks," Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011), Portland, pp. 2608-2618, 2011.

[21] M. Pini, M. Fantino, A. Cavaleri, S. Ugazio, and L. L. Presti, "Signal Quality Monitoring Applied to Spoofing Detection," in Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011), pp. 1888-1896, 2011.

[22] B. M. Ledvina, W. J. Bencze, B. Galusha, and I. Miller, "An In-line Anti-spoofing Device for Legacy Civil GPS Receivers," in Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, pp. 698-712, 2010.

[23] A. Cavaleri, B. Motella, M. Pini, and M. Fantino, "Detection of Spoofed GPS Signals at Code and Carrier Tracking Level," in 2010 5th IEEE ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), pp. 1-6, 2010.

[24] A. Broumandan, A. Jafarnia-Jahromi, and G. Lachapelle, "Spoofing Detection, Classification and Cancelation (SDCC) Receiver Architecture for a Moving GNSS Receiver," GPS Solut., vol. 19, no. 3, pp. 475-487, 2015.

[25] A. Baziar, M. Mosavi, and M. Moazedi, "Spoofing Mitigation Using Double Stationary Wavelet Transform in Civil GPS Receivers," Wireless Personal Communications, vol. 109, no. 3, pp. 1827-1844, 2019.

[26] M. Mosavi, R. Zebarjad, and M. Moazedi, "Novel Anti-spoofing Methods Based on Discrete Wavelet Transform in the Acquisition and Tracking Stages of Civil GPS Receiver," Int. J. Navig. Obs., vol. 25, no. 4, pp. 449-460, 2018.

[27] Y. Guo, L. Miao, and X. Zhang, "Spoofing Detection and Mitigation in a Multi-correlator GPS Receiver Based on the Maximum Likelihood Principle," Sensors, vol. 19, no. 1, p. 37, 2019.

[28] J. N. Gross, C. Kilic, and T. E. Humphreys, "Maximum-likelihood Power-distortion Monitoring for GNSS-signal Authentication," IEEE Trans Aerosp Electron Syst, vol. 55, no. 1, pp. 469-475, 2019.

[29] E. Shafiee, M. Mosavi, and M. Moazedi, “Detection of Spoofing Attack Using Machine Learning based on Multi-layer Neural Network in Single-frequency GPS Receivers,” Journal of Navigation, vol. 71, no. 1, pp. 169-188, 2018.

[30] S. Tohidi and M. R. Mosavi, “Effective Detection of GNSS Spoofing Attack Using A Multi-Layer Perceptron Neural Network Classifier Trained by PSO,” 2020 25th International Computer Conference, Computer Society of Iran (CSICC), Tehran, Iran, pp. 1-5, 2020.

[31] S. Semanjski, I. Semanjski, W. De Wilde, and A. Muls, “Use of Supervised Machine Learning for GNSS Signal Spoofing Detection with Validation on Real-world Meaconing and Spoofing Data—part I,” Sensors, vol. 20, no. 4, 2020.

[32] P. Borhani Daria, H. LI , P. Wu, and P. Closas“. Deep Neural Network Approach to Detect GNSS Spoofing Attacks,” Proc. ION GNSS, 3241-3252, September 21-25, 2020.