ترکیب اطّلاعات ناوبری اینرسی و GPS به کمک شبکه‌های عصبی مصنوعی

محمّد گرجی سفیدمزگی[۱]، محمّد فرخی[۲،*]
دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران
* قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت
m.gorji@ee.iust.ac.ir, farrokhi@iust.ac.ir

چکیده

سیستم‌های ناوبری اینرسی و GPS (Global Positioning System) به طور وسیع برای موقعیت‌یابی به کار می‌روند. گستره کاربرد آنها از وسایل متحرّکی چون اتومبیل تا سیستم‌های هوافضا مثل موشک‌ها و هواپیماها است. هر کدام از این سیستم‌ها دارای معایب و مزایایی هستند. سیستم ناوبری اینرسی وابسته به اطّلاعات خارجی نیست، اما در اثر عوامل متعدّدی چون خطای سنسورهای اینرسی و خطای اولیه (همراستایی)، دارای خطایی است که با گذشت زمان افزایش می‌یابد. سیستم GPS می‌تواند اطّلاعات موقعیت را با دقت خوب فراهم کند ولی چون وابسته به سیگنال‌های رادیویی است که از ماهواره به جسم متحرّک گسیل می‌شود، همواره در دسترس نیست. از این رو ترکیب اطّلاعات سیستم‌های ناوبری اینرسی و GPS می‌تواند مزایا را افزایش داده و مشکلات را برطرف‌کنند. این کار معمولاً به کمک فیلترهای تخمین‌گر بهینه همانند فیلتر کالمن انجام می‌شود. اما روش‌های کلاسیکی چون کالمن معایبی نیز دارند که در این مقاله بررسی شده است. مهمترین آن، وابستگی به مدل دینامیکی سیستم است. در این مقاله ترکیب اطّلاعات توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی صورت پذیرفته است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد بسیار بهتر شبکه عصبی در مقایسه با فیلتر کالمن را هنگامی که سیگنال GPS قطع می‌شود، نشان می‌دهد.

واژه های کلیدی: *ناوبری اینرسی- GPS – ترکیب اطّلاعات – شبکه‌های عصبی مصنوعی.*

مقدمه

ناوبری اینرسی (Inertial Navigation System) یا INS یکی از روش‌های موقعیت‌یابی است که بر اساس قوانین نیوتن کار می‌کند. از این روش در سیستم‌های هوا-فضا همانند هواپیما، موشک، زیردریایی و ماهواره و همچنین در خودروها و روبات‌های متحرّک استفاده می‌شود. یک دسته سنسورهای اینرسی که به همراه هم در یک بسته به نام IMU (Inertial Measurement Unit) قرار گرفته‌اند، اطّلاعات ورودی برای سیستم ناوبری فراهم می‌سازند. دو نوع سنسور اینرسی مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از شتاب‌سنج (Accelerometer) و ژیروسکوپ (Gyroscope). سه شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری شتاب خطّی و سه ژیروسکوپ برای اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای به طور متعامد به جسم متحرّک متّصل می‌شوند. به کمک خروجی ژیروسکوپ‌ها، ماتریس کسینوس‌های هادی (Direction CosineMatrix) یا DCM که همان ماتریس تبدیل میان دستگاه مختصّات بدنه (Roll – Pitch – Yaw) و دستگاه مختصّات مرجع ناوبری است، به‌هنگام می‌شود. با ضرب این ماتریس در خروجی شتاب‌سنج‌ها، شتاب جسم متحرّک از دستگاه مختصّات بدنه به دستگاه مختصّات مرجع منتقل می‌شود و پس از جمع شتاب مذکور با بردار گرانش محلی زمین، شتاب جسم متحرّک در راستاهای دستگاه مختصّات مرجع به دست می‌آید. انتگرال‌گیری مضاعف از این شتاب، جابه‌جایی جسم را در این راستاها تعیین می‌کند. ناوبری اینرسی علاوه بر موقعیت، سرعت و وضعیت (attitude) جسم را نیز تعیین می‌کند. شکل ۱ نحوه عملکرد سیستم ناوبری اینرسی را نشان می‌دهد [۱].

همان‌طور که بیان شد ورودی‌های سیستم، داده‌های ۶ سنسور اینرسی (۳ شتاب‌سنج و ۳ ژیروسکوپ) است و خروجی‌های سیستم ناوبری نیز عبارتند از وضعیت ، سرعت و موقعیت جسم در سه راستای دستگاه مختصّات مرجع. وضعیت جسم متحرّک به زوایای انحراف از افق (Roll و Pitch) و زاویه انحراف از شمال جغرافیایی (زاویه سَمت Azimuth) اطلاق می‌شود. پیش از ناوبری، بایستی دستگاه مختصّات مرجع ناوبری تعیین شود. در صورتی که دستگاهی تعریف کنیم که با چرخش زمین محورهای آن جابه جا نشوند، این دستگاه با عنوان دستگاه مختصّات لَخت (Inertial) شناخته می‌شود. در حقیقت شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها، متغیرهای مربوط به خود را نسبت به دستگاه مختصّات لَخت اندازه‌گیری می‌کنند. در این مقاله از دستگاه مختصّات زمین (e – frame) استفاده می‌شود. محورهای این دستگاه متّصل به زمین بوده و همراه با زمین می‌چرخند. هنگامی که مسافت طی‌شده توسط جسم، نسبت به یک نقطه ثابت روی زمین نسبتاً کم باشد، این دستگاه مناسب است [۲و۳]. (ابتدا بگویید که چه رابطه‌ای را می‌خواهید ارائه کنید)

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد کنترل دانشگاه علم و صنعت ایران
۲- دانشیار گروه کنترل دانشگاه علم و صنعت ایران

طبق معادلات زیر وضعیت، سرعت و موقعیت بـه دسـت مـی‌آیـد. ابتدا ماتریس DCM بهنگام می شود.

$$\dot{C}_b^e = C_b^e(\Omega_{ib}^b - C_b^e\Omega_{ie}^e) \quad (۱)$$

که درآن Ω_{ib}^b و Ω_{ie}^e به‌ترتیب شکل پادمتقارن بردار خروجی بردار خروجی ژیروسکوپ‌ها و سرعت زاویه‌ای کره زمین و C_b^e نیز ماتریس DCM است که مبدل بردار از دستگاه مختصّات بدنه به دستگاه مختصّات زمین است. یعنی با ضرب این ماتریس در هر بردار که در دستگاه مختصّات بدنه باشد، می‌توان آن بردار را به دستگاه e-frame منتقل کرد. برای شکل پادمتقارن داریم

$$x=[x_1,x_2,x_3]^T \Rightarrow X=\begin{bmatrix}0 & -x_3 & x_2\\ x_3 & 0 & -x_1\\ -x_2 & x_1 & 0\end{bmatrix} \quad (۲)$$

و برای تعیین مقدار سرعت و موقعیت خواهیم داشت

$$\begin{aligned} f^e &= C_b^e f^b \\ \frac{d}{dt}v^e &= (-2\Omega_{ie}^e v^e - \Omega_{ie}^e\Omega_{ie}^e p^e) + f^e + g^e \\ \frac{d}{dt}p^e &= v^e \end{aligned} \quad (۳)$$

که در آن f^b خروجی شتاب‌سنج‌ها، f^e شتاب جسم نسبت به دستگاه مرجع و v^e و p^e به‌ترتیب سرعت و موقعیت نسبت به این دستگاه هستند. وضعیت جسم متحرّک یعنی میزان انحراف نسبت به صفحه افق (tilt) و زاویه سمت (azimuth) مستقیماً از ماتریس DCM به دست می‌آید[۲].

خطای سیستم ناوبری اینرسی

در اثر عوامل مختلفی در سیستم ناوبری اینرسی خطا پدیدار می‌شود. مهمترین این عوامل عبارتند از:

۱- خطای سنسورهای اینرسی (شامل بایاس، مقیاس و ...)
۲- خطای اولیه سرعت، وضعیت و موقعیت
۳- مدل‌سازی نادرست گرانش زمین

به سبب انتگرال‌گیری در معادلات ناوبری، این خطاها با گذشت زمان رشد می‌نمایند. در واقع بزرگترین ایراد سیستم ناوبری اینرسی، رشد خطای آن در گذر زمان است. از این رو نیاز به سیستم‌های کمک ناوبری احساس می‌شود که اطّلاعات سرعت، وضعیت یا موقعیت را از منبعی دیگر فراهم نماید. سیستم کمک ناوبری، اطّلاعات را از روشی دیگر به طور مطلق و با فرکانسی کمتر از فرکانس سیستم ناوبری اینرسی تولید می‌کند تا خطای ناوبری محدود باقی بماند. یکی از مهمترین این سیستم‌ها، GPS است که عبارت است از ماهواره‌هایی در اطراف زمین که با ارسال سیگنال‌هایی به وسایل مجهّز به آنتن GPS این امکان را می‌دهد که سرعت و موقعیت خود را محاسبه کند. ایراد این روش آن است که نیاز به خط دید مستقیم به حدّاقل چهار ماهواره دارد. در نقاط شهری، سیگنال‌های GPS تضعیف یا مسدود می‌شوند و بر عملکرد GPS اثر منفی می‌گذارند. از سوی دیگر، امکان ایجاد اختلال تعمّدی نیز در سیگنال های GPS وجود دارد [۳].

اما آنچه بایستی بررسی شود چگونگی ترکیب اطّلاعات دو منبع مختلف است، به‌طوری که تخمین موقعیت، سرعت و وضعیت جسم متحرّک بهینه شود، یعنی خطای تخمین کمینه‌گردد. معمولاً ترکیب اطّلاعات ناوبری اینرسی به‌کمک فیلترهای تخمین‌گر بهینه مانند خانواده فیلتر کالمن انجام می‌پذیرد. از آنجا که روش کالمن مبتنی بر مدل است، ابتدا بایستی خطای ناوبری مدل‌سازی شود. به‌طور کلی دو نوع مدل خطا برای سیستم ناوبری اینرسی تعریف شده است: مدل زاویه φ و مدل زاویه ψ. نشان‌داده شده است که این دو مدل خطا معادل یکدیگرند [۴]. معادلات خطای ناوبری به شکل سیستم فضای حالتی است که ورودی آن خطاهای سنسورهای اینرسی و حالت‌های آن خطاهای جهت، سرعت و موقعیت است. وظیفه فیلتر تخمین‌گر بهینه، تعیین این حالت‌ها است. اگر معادلات خطای ناوبری را به شکل معادله (۴) در نظر گرفته‌شوند

$$\begin{aligned} \delta\dot{x} &= f(\delta x, u) \\ u &= \begin{bmatrix}\delta f^b \\ \delta\omega_{ib}^b\end{bmatrix} \end{aligned} \quad (۴)$$

بردار x، دارای ۹ مؤلفه است که عبارتند از خطای جهت، سرعت و موقعیت در سه راستا. بردار u ورودی به سیستم نیز خطای سنسورهای اینرسی است. (از خطای مدل‌سازی گرانش زمین صرفنظر شده است). در (۴) x بردار خطای ناوبری و δf^b و $\delta\omega_{ib}^b$ به‌ترتیب خطا شتاب‌سنج‌ها و ژیروسکوپ‌ها است. مهمترین خطای سنسورهای اینرسی شامل بایاس (خطای ثابت) و نویز (خطای تصادفی) می‌شود. سیستم کمک ناوبری نیز می‌تواند اطّلاعات سرعت، وضعیت یا موقعیت را فراهم کند. برای مثال وسیله متحرّک متّصل به آنتن GPS قادر است سرعت و موقعیت خود را به‌طور مطلق محاسبه کند. در بیشتر موارد، سیستمGPS موقعیت جسم متحرّک (p) را تعیین می‌کند. در این صورت

$$\begin{aligned} z &= p_{GPS} - p_{INS} \\ z &= g(\delta x) \end{aligned} \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، z بردار *نوآوری* (Innovation) مورد نیاز برای به‌هنگام کردن حالت‌های فیلتر کالمن است که با تابع g، به متغیرهای حالت مرتبط می‌شود. معادلات (۴) و (۵) به‌ترتیب به‌عنوان معادله‌های فرآیند و اندازه‌گیری برای فیلتر کالمن در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، در طول زمان به‌کمک بردار نوآوری، حالت‌های سیستم که همان خطاهای سرعت، موقعیت و وضعیت هستند تخمین زده می‌شوند. با ترکیب اطّلاعات INS و GPS، خطاهای جهت، سرعت و موقعیت و نیز پارامترهای خطای سنسورهای اینرسی تعیین می‌شوند. این فرآیند، *کالیبراسیون حین‌عملکرد* نام دارد و درصورتی که درست انجام شود، می تواند

خطای سیستم ناوبری را بسیار کاهش دهد. شکل ۲ نحوه ترکیب اطّلاعات به کمک کالمن را نشان می دهد [۵ و ۶]. لیکن، روش فیلتر کالمن دارای معایبی چند است:
این روش به صحت مدل استخراج شده برای سیستم ناوبری و کمک ناوبری وابستگی دارد. یعنی بایستی معادلات f و g در روابط ۴ و ۵ دقت کافی داشته باشند. اگر فیلتر در برابر داده‌ای قرار گیرد که متناسب با مدل آن نباشد، تخمین قابل اعتمادی نخواهد داشت.

۱- مدل‌سازی خطای سنسورها همواره دقت کافی ندارد. در واقع خطاهایی تصادفی در سنسورهای اینرسی وجود دارد که از پیش، مدل‌سازی دقیق آنها مقدور نیست. در واقع مدل‌سازی آنها نمی‌تواند عملکرد سنسورها را در همه محیط‌ها و برای مدت طولانی، بیان کند. این مسأله در مورد سنسورهای ارزان‌قیمت اینرسی حادتر است. و نیز لزوماً نویز سنسورهای اینرسی سفید نیست.
فیلتر کالمن وابسته به داده‌هایی است که از قبل دقیقاً مشخص نیستند. ماتریس کواریانس نویز اندازه‌گیری و نویز فرآیند ممکن است دقیقاً معلوم نباشند و یا با گذر زمان تغییر کنند. همچنین این روش، به مقادیر اولیه تخمین حالت‌ها و کواریانس حالت‌ها حساس است.

۲- فیلتر کالمن نیازمند آن است که حالت‌های تخمینی، مشاهده‌پذیر باشند. در صورت کاهش مشاهده‌پذیری سیستم، توانایی تخمین درست نیز کاهش می‌یابد [۷].
این عوامل دست به دست هم می‌دهند و در نهایت می‌توانند حتی منجر به واگرایی فیلتر کالمن شوند [۸].

شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی، پردازنده موازی‌اند که می‌توانند توابع غیرخطّی و پیچیده‌ای را تقریب بزنند که با روش‌ها و الگوریتم-های کلاسیک امکان پذیر نیست. شبکه عصبی از تعدادی عنصر محاسباتی به نام نورون تشکیل یافته است که هر دو نورون با یک اتصال وزن‌دار به هم مربوط می‌شوند. عملکرد یک شبکه عصبی با وزن‌های آن بیان می‌شود. پس از اعمال داده‌های آموزش به شبکه، این وزن‌ها تغییر می‌کنند و به مقدارهایی همگرا می‌شوند که به شبکه عصبی ساخته شده از این وزن‌ها امکان می‌دهد تابع غیرخطی را تقریب زند. انواع مختلفی از شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود که یکی از ساده‌ترین و مهمترین آنها، پرسپترون چند لایه (Multi LayerPerceptron) یا MLP است. الگوریتم-های متعددی برای آموزش شبکه MLP وجود دارد که در این مقاله برای آموزش شبکه عصبی از الگوریتم لونبرگ – مارکوِر(Levenberg -Marquardt) استفاده شده است. در این الگوریتم، آموزش مرتبه دوم شبکه عصبی بدون نیاز به محاسبه ماتریس هسین انجام می‌پذیرد. نکته کلیدی این الگوریتم تقریب ماتریس هسین به کمک ماتریس ژاکوبین خطای شبکه عصبی نسبت به وزن‌ها است [۹].

در این مقاله، یک شبکه MLP ساخته می‌شود و تا زمانی که اطّلاعات کمک ناوبری در اختیار است، شبکه به‌صورت وصل-خط (online) آموزش می‌بیند. در این مدت وزن‌های شبکه متناسب با ورودی‌ها به‌هنگام می‌شوند. در مرحله بعد، زمانی که سیستم کمک‌ناوبری GPS از دسترس خارج شد، شبکه آموزش دیده مورد استفاده قرار می‌گیرد و به‌عنوان تصحیح‌گر خطای ناوبری عمل می‌کند. مسأله مهم، تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های شبکه عصبی و ابعاد آن است. شبکه عصبی آموزش دیده در این مقاله، زاویه سمت، شتاب سرعت و موقعیت تعیین شده توسط سیستم ناوبری اینرسی را در هر لحظه به همراه مقادیر لحظه قبل آنان دریافت می‌کند و در خروجی نیز موقعیت به دست آمده از GPS برای آموزش شبکه استفاده می‌شود. به منظور بهبود عملکرد شبکه، خروجی‌های شبکه در لحظه قبل نیز به ورودی‌ها افزوده می‌شوند. این شبکه می‌تواند با آموزش کافی، دینامیک حرکت جسم را فراگیرد و در بازه زمانی که اطّلاعات GPS قطع شده است، موقعیت جسم را تخمین بزند. نمای شبکه عصبی استفاده شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

در ابتدا، شبکه با وزن های تصادفی ایجاد می‌شود، خروجی سنسورهای اینرسی وارد پردازنده شده و پس از اعمال رابطه (۳) بر آنها، وضعیت، سرعت و موقعیت به دست می‌آید. این متغیرها به‌عنوان ورودی‌های شبکه درنظر گرفته می‌شوند. از سوی دیگر هنگامی که اطّلاعات GPS در دسترس است، موقعیت کسب شده از GPS به‌عنوان خروجی مطلوب شبکه عصبی برای آموزش شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجّه به حرکت جسم در صفحه افقی، هر کدام از متغیرهای شتاب، سرعت و موقعیت خود دارای دو مؤلّفه هستند.

شبیه سازی

برای بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، یک سیستم ناوبری اینرسی در نرم‌افزار ®MatLab شبیه‌سازی شده است. از آن‌جایی‌که کانال عمودی وابستگی (Coupling) کمی با کانال افقی ناوبری دارد، از آن صرفنظر می‌شود [۱]. قبل از آموزش همزمان شبکه عصبی در هنگام عملیات ناوبری، لازم است با تعدادی داده ورودی-خروجی مناسب به‌طور قطع-خط (offline) شبکه آموزش یابد. هدف از این کار، قرارگرفتن وزن‌های شبکه در نزدیکی مقدار مطلوبی است که قرار است بدان همگرا شود و در نتیجه طول مدت همگرایی در آموزش وصل-خط کاهش یابد.

جسم متحرّک مسیری را در صفحه افقی طی می‌کند. فرض می‌شود سنسورهای اینرسی در معرض خطای بایاس و نویز هستند. بدیهی است دانستن مدل خطای سنسورها در الگوریتم پیشنهادی ضرورتی ندارد و صرفاً برای شبیه‌سازی لازم است. منحنی این مسیر در شکل ۴ ترسیم شده است. اطّلاعات سیستم

کمک ناوبری GPS نیز در طول عملیات ناوبری فراهم است که موقعیت جسم متحرّک را در راستاهای شمال و شرق به‌طور مطلق تعیین می‌کند. لیکن، اطّلاعات GPS نیز به نویزی با کواریانس ۱ متر آغشته است. همان‌طور که پیشتر بیان شد، زاویه سمت، شتاب سرعت و موقعیت تعیین شده توسط سیستم ناوبری اینرسی به همراه مقادیر لحظه قبل آنان ورودی‌های شبکه عصبی هستند و داده بدست آمده از GPS به عنوان خروجی مطلوب شبکه عصبی برای آموزش شبکه استفاده می‌شود. شبکه دارای ۳۵ نورون در یک لایه پنهان است. تا زمانی که داده GPS فراهم است، آموزش شبکه ادامه خواهد یافت.

اطّلاعات خارجی GPS ً در طول بازه زمانی ۵ دقیقه‌ای حذف می‌شود. در این مدت، شبکه عصبی به‌جای آموزش، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. شکل‌های ۵ و ۶ نمایانگر خطای موقعیت در راستاهای شمال و شرق در این بازه زمانی است. خطای موقعیت در صورتی که از فیلتر کالمن توسعه یافته برای ترکیب اطّلاعات استفاده شده باشد، نیز ترسیم شده است. مقایسه این نمودارها، عملکرد مناسب الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. مسأله مهم دیگر آن است که شبکه عصبی بتواند دوباره پس از وصل شدن GPS به آموزش ادامه داده و خطای خروجی را کاهش‌دهد. شکل ۷ خطای خروجی شبکه عصبی، به‌هنگام آموزش پس از وصل شدن GPS را نشان می‌دهد.

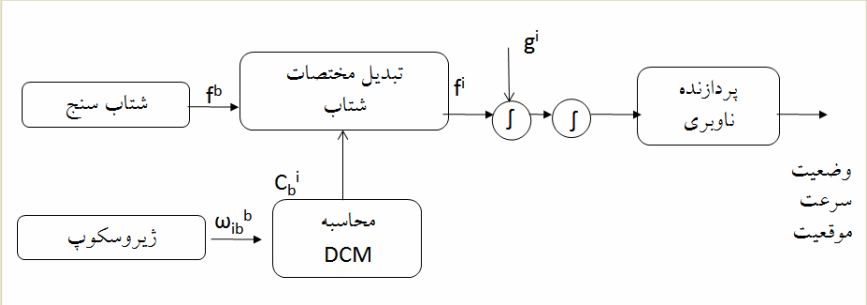
نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب گفته‌شده، در صورتی که اطّلاعات سیستم GPS قطع گردد، اطّلاعات موقعیت بایستی از سیستم INS حاصل شود. از این‌رو، ترکیب اطّلاعات بین دو سیستم مذکور انجام می‌گیرد تا خطای ناوبری کاهش یابد. معمولاً این‌کار توسط EKF صورت می‌پذیرد. در اینجا روشی مبتنی بر شبکه عصبی معرفی شده است.

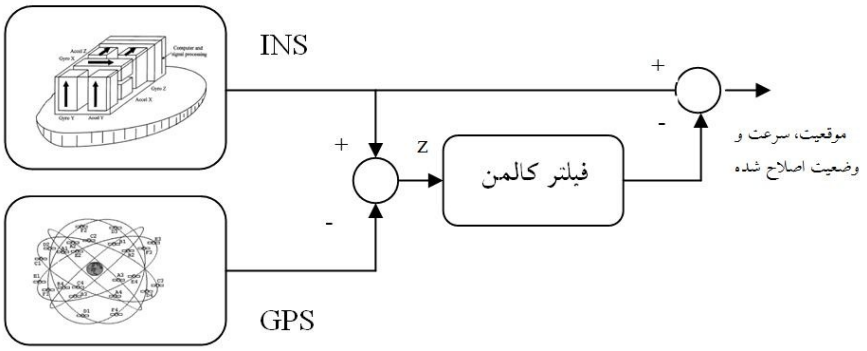
نمودارها نشان می‌دهند چنانچه زمان قطع GPS محدود به چند دقیقه باشد، شبکه عصبی عملکرد قابل قبولی را نسبت به EKF دارد. اما زمان طولانی در دسترس نبودن سیستم کمک ناوبری، خطای موقعیت‌یابی را در هر دو روش افزایش می‌دهد. از مزایای دیگر استفاده از شبکه‌های عصبی، عدم نیاز به مدل خطای ناوبری و کواریانس نویز اندازه‌گیری و فرایند است.

مراجع

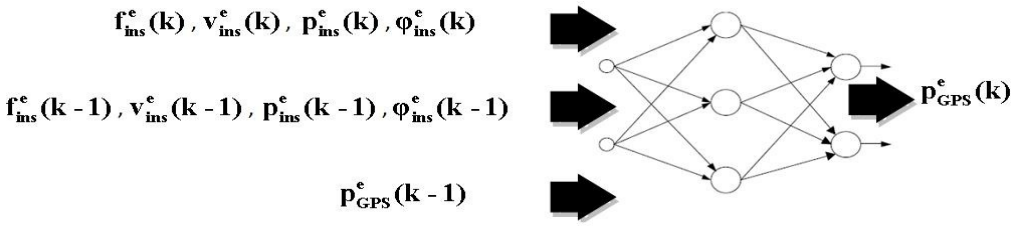
1. Jekeli Ch., *Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications*. Walter de Gruyter, Berlin, 2000.
2. Titterton D., *Strapdown Inertial Navigation Technology*, IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series, London, 1997.
3. Kong X. , INS algorithm using quaternion model for low cost IMU, *Elsevier Robotics and Autonomous Systems*, vol. 46, pp. 221-246, 2004.
4. Faruqi F.A., Non-linear Mathematical Model for Integrated Global Positioning/Inertial Navigation Systems. *Elsevier Applied Mathematics and Computation*, vol. 115, pp. 213-227, 2000.
5. Grewal M., *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*, Wiley-Interscience, New York, 2007.
6. Rogers R.M., *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*, 2nd ed., AIAA Education Series, Reston, 2003.
7. Rhee I., Observability of an Integrated GPS/INS During Maneuvers, *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, pp. 526-535, APRIL 2004.
8. Wang J.H., *Intelligent MEMS INS/GPS Integration for Land Vehicle Navigation*, PhD Dissertation, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, 2006.
9. Hagan M.T., Demuth H.B. and Beale M., *Neural Network Design*, PWS Publishing, Boston, 1996.



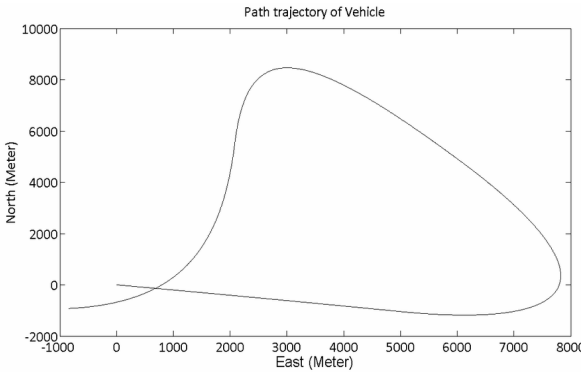
شکل ۱: نمودار چگونگی محاسبات سیستم ناوبری اینرسی



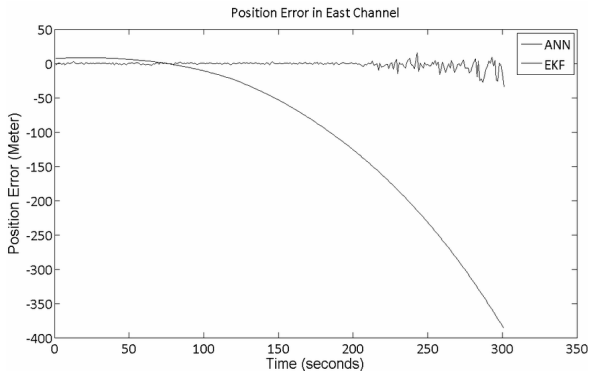
شکل ۲: ترکیب اطّلاعات به کمک فیلتر کالمن



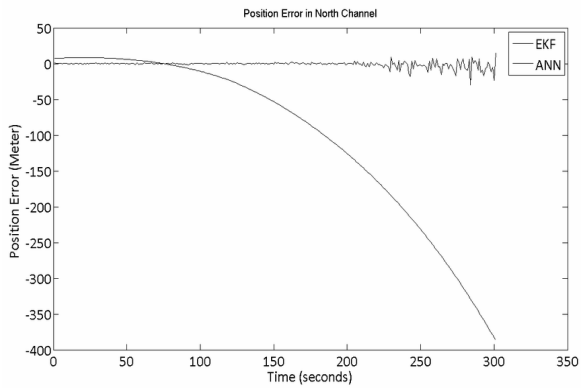
شکل ۳: ساختار شبکه عصبی استفاده شده



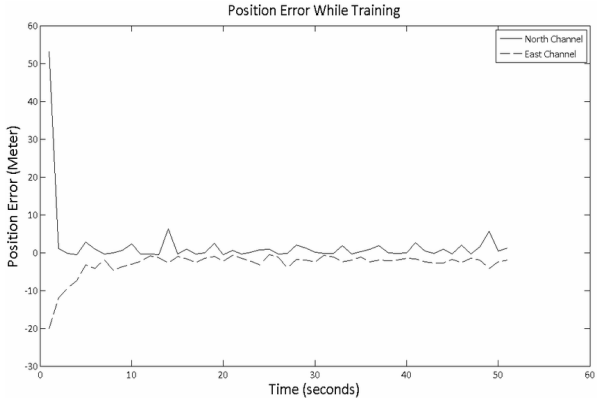
شکل ۴: منحنی مسیر طی شده توسط جسم



شکل ۵: خطای موقعیت در راستای شرق



شکل ۶: خطای موقعیت در راستای شمال



شکل ۷: خطای شبکه عصبی پس از برقرارشدن سیگنال GPS