

مقاله پژوهشی

موقعیت‌یابی تفاضلی ارزان قیمت برای کاربردی‌سازی کشاورزی دقیق در مناطق کمتر توسعه‌یافته

محمد مزیدی^۱، محمد حسین عباسپور فرد^{۲*} و محمد رضا اکبرزاده توتونچی^۳

چکیده

یکی از مؤلفه‌ها و اجزاء مهم "کشاورزی دقیق" که در تمام دنیا با سرعت زیادی در حال رشد است، موقعیت‌یابی مناسب می‌باشد. با پیشرفت تکنولوژی، دقت GPS نیز بهبود یافته است، اما استفاده از این سنسورها در کشورهای کمتر توسعه‌یافته همچنان با چالش تکنولوژی و هزینه روبرو است. ارتباط مستقیم دقت و قیمت GPS منجر به تلاش‌هایی برای استفاده از GPS‌های ارزان قیمت شده است. با این حال استفاده از GPS ارزان قیمت دارای منابع مختلف خطا است. در این پژوهش برای غلبه بر چالش ارتقا دقت موقعیت‌یابی در حین کاهش قیمت تجهیزات، روش جدیدی ارائه شده است. روش پیشنهادی براساس ماهیت خطای GPS (خطای تصادفی و بایاس) به دو قسمت تقسیم شده است. در ابتدا، خطای تصادفی با استفاده از فیلتر کلاسیک ساده کاهش یافته است. به این منظور، مقایسه‌ای بین سه فیلتر کالمن، پایین‌گذر و میانگین متحرک انجام شده است. تنظیمات فیلترها به گونه‌ای انجام شده است که علاوه بر کاهش خطای تصادفی، در کمترین زمان ممکن به محدوده خطای مطلوب برسد. فیلتر کالمن در کاهش خطای تصادفی نسبت به دو فیلتر دیگر بهترین عملکرد را داشته است. حذف بایاس جز با استفاده از گیرنده DGPS که قابلیت دریافت اصلاحات ارسال از ایستگاه‌های مبنا را دارند امکان‌پذیر نیست. برای حل این مشکل، ایستگاه مبنایی طراحی شده است که قابلیت ارسال اصلاحات موردنیاز گیرنده‌های ارزان قیمت را داشته‌باشد. روش موقعیت‌یابی تفاضلی ارزان قیمت پیشنهادشده منجر به کاهش ۸۹٪ در شاخص خطای افقی شده است که دقت حاصل برای کاربردهای کشاورزی دقیق مناسب است.

واژه‌های کلیدی: تصحیحات تفاضلی، خطای تصادفی، خطای بایاس، کشاورزی دقیق، گیرنده GPS ارزان قیمت.

ارجاع: مزیدی م.، عباسپور فرد م. ح. و اکبرزاده توتونچی م. ر. ۱۴۰۰. موقعیت‌یابی تفاضلی ارزان قیمت برای کاربردی‌سازی کشاورزی دقیق در مناطق کمتر توسعه‌یافته. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۱۹: ۲۳-۳۲.

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- استاد گروه مهندسی برق، قطب علمی رایانش نرم و پردازش هوشمند اطلاعات، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

* نویسنده مسئول: abaspour@um.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۳

مقدمه

تغییرپذیری مکانی، مفهومی کلیدی در کشاورزی دقیق است. در حقیقت کشاورزی دقیق با مدیریت تغییرات در سطح مزرعه منجر به افزایش عملکرد می‌شود (Asadi & Maghsoudi, 2020). سامانه موقعیت‌یابی جهانی^۱ (GPS) یک سامانه شناخته‌شده برای به دست آوردن اطلاعاتی در مورد موقعیت، زمان و سرعت یک شی است. دقت موردنیاز GPS در کشاورزی بر اساس کاربردهای مختلف در داخل مزرعه تغییر می‌کند. این دقت برای کاربردهای مثل نظارت بر عملکرد و نمونه‌گیری از خاک، کمتر از یک متر، برای کودپاش‌ها و سم‌پاش‌ها کمتر از ۰/۵ متر و برای نشاکارها و بذکارها کمتر از ۰/۴ متر توصیه شده است (Pérez-Ruiz et al., 2011). از طرف دیگر تکنولوژی GPS نیز سطوح دقت مختلفی دارد. این تفاوت‌ها بدلیل منابع مختلف خطا است. خطاهای GPS به سه دسته شامل خطاهای فضا، گیرنده و انتشار تقسیم می‌شوند. خطاهای فضا به خطاهای ساعت ماهواره و مدار ماهوار مرتبط است. خطاهای گیرنده شامل خطاهای نویز و ساعت گیرنده است و تأخیر یونیسفریک، تأخیر تروپوسفریک و چندمسیری نیز جزو خطاهای انتشار GPS هستند (Noureldin et al., 2012).

روش‌های متعددی برای کاهش یا حذف این خطاها وجود دارد. برخی از آنها نظیر GPS تفاضلی^۲ (DGPS) و GPS سینماتیک بلادرنگ^۳ (RTK-GPS) از ایستگاه‌های مبنا با موقعیت‌های مشخص استفاده می‌کنند که اصلاحات موردنیاز را برای گیرنده‌هایی که در محدوده آنها هستند ارسال می‌کنند. DGPS و RTK-GPS یکی از مهمترین راهکارها برای کاهش خطاهای GPS در عملیات کشاورزی دقیق هستند (Borgelt et al., 1996). اما این تکنیک‌ها گران‌قیمت بوده و یا نیاز است تا در نزدیکی محدوده مورد نظر باشند. کشاورزان در کشورهای کمتر توسعه‌یافته با مشکلات مالی و ساختاری برای پیاده‌سازی کشاورزی دقیق روبرو هستند. با وجود آنکه برخی از تحقیقات (Hu et al., 2003) با هدف توسعه شبکه ایستگاه‌های مبنا برای افزایش دقت و منطقه تحت پوشش انجام شده‌اند، کاهش هزینه در کنار ارتقا قابلیت اطمینان اولویت بیشتری در برخی شرایط دارد.

امکان استفاده از GPS ارزان قیمت در کشاورزی در برخی از مطالعات بررسی شده است. در یک نمونه، دقت GPS ارزان قیمت استفاده‌شده در ۸۰٪ مواقع کمتر از ۱۵ متر بوده‌است از این‌رو برای استفاده در مناطق تولید زغال‌سنگ توصیه شده است (Holden et al., 1999). در پژوهشی دیگری (Yao & Clark, 2000) بدلیل قیمت بالا و سختی استفاده از گیرنده GPS دو فرکانسه، از یک گیرنده تک فرکانسه با خطای افقی بین ۲ تا ۵ متر استفاده شده است. GPS ارزان قیمت با دقت کمتر از ۳ متر برای تعیین حرکت جانبی یک سامانه آبیاری استفاده شده است که نتایج به دست آمده نشان داده‌است که تنها ۵ درصد نقاط، خطایی به بزرگی ۶/۶ متر داشته‌اند (Peters & Evett, 2005). علاوه بر تعیین موقعیت برای محاسبه سرعت نیز از GPS ارزان قیمت استفاده شده است (Rovira-Más et al., 2015). یک گیرنده ارزان قیمت هم می‌تواند مانند DGPS بخشی از یک راه حل باشد. در حقیقت بدلیل وجود منابع خطا مانند چند مسیری یا مسدودشدن سیگنال، DGPS نیز نمی‌تواند به‌صورت بلندمدت پایدار باشد. همچنین به منظور ارزیابی کارایی اندازه‌گیری سرعت ثابت و متغیر نیز بین دو گیرنده GPS ارزان قیمت مقایسه‌ای انجام شده است (Keskin et al., 2017). هزینه بالای گیرنده DGPS و همچنین هزینه بالای خدمات RTK-GPS و تغییرپذیری مشخصات خاک در مقیاس‌هایی بالاتر از یک متر، محققان را بر آن داشته است تا از گیرنده‌های ارزان قیمت برای نقشه‌برداری هدایت‌پذیری الکتریکی خاک استفاده کنند (Rudolph et al., 2018).

تحقیقات کمی بر روی قابلیت استفاده از گیرنده‌های GPS ارزان قیمت در عملیات کشاورزی دقیق انجام شده است. اما بیشتر مطالعات انجام‌شده بر روی کاهش خطا و رسیدن به دقت مطلوب است. در مطالعه‌ای بررسی تأثیر شرایط بر دقت اندازه‌گیری توسط گیرنده‌های GPS انجام شده است. در این ارتباط تأثیر فصل اندازه‌گیری، زمان اندازه‌گیری در طول روز و سیستم ماهواره‌ای بر روی خطای گیرنده مطالعه شده است و برای هر فاکتور دو سطح در نظر گرفته شده است (Sisman et al., 2014). در تحقیق دیگری از تأثیر پارامترهای مدت زمان اندازه‌گیری، فرکانس اندازه‌گیری و زاویه ماسک بررسی شده است (Sisman, 2014). زاویه ماسک، حداقل زاویه از سطح افق

1- Global Positioning System

2- Differential GPS

3- Real-time kinematic GPS

مواد و روش‌ها

در مطالعه حاضر آزمایش‌ها در محدوده دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد (36.309571°N, 59.532049° E, 1012.754 m) انجام شده‌اند. گیرنده GPS ارزان قیمت از نوع (U-blox Co., Thalwil, Ublox NEO-6M Switzerland) با قیمت روز ۲۰ دلار است. این گیرنده فاقد فیلتر کالمن است. جدول ۱ برخی از مشخصات مهم این گیرنده فوق را نشان می‌دهد. ماژول‌های GPS از طریق پورت‌های USB به رایانه متصل شده و تنظیمات مرتبط با تمام گیرنده‌ها و همچنین دریافت داده‌ها از طریق نرم‌افزار U-center که توسط شرکت سازنده ماژول‌ها ارائه شده، انجام شده است. داده‌ها بر اساس استاندارد انجمن ملی الکترونیک دریایی^۲ (NMEA) و در قالب فایل متنی (TXT) دریافت می‌شوند. در این داده‌ها برای هر لحظه داده‌برداری اطلاعاتی در مورد موقعیت‌یابی وجود دارد. این اطلاعات که با \$GPRMC شروع می‌شوند شامل طول و عرض جغرافیایی، سرعت و غیره هستند.

جدول ۱- برخی از مشخصات گیرنده GPS استفاده شده در این

تحقیق

شرح	مشخصه
۵۰	تعداد کانال‌ها
NMEA 0183 v.2.3	خروجی NMEA
تا ۵ هرترز	نرخ به‌روزرسانی
۲/۵ متر CEP	دقت اسمی موقعیت‌یابی
حالت سرد: تقریباً ۲۷ ثانیه	زمان راه‌اندازی
حالت داغ: تقریباً ۱ ثانیه	

شاخص‌های متعددی برای اندازه‌گیری دقت موقعیت‌یابی GPS وجود دارد که برخی از مهمترین این شاخص‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. برای تمام سنجش‌های انجام‌شده، انحراف معیار فاصله بین موقعیت صحیح و موقعیت تخمین زده‌شده در دو محور مختصات (σ_x برای محور x و σ_y برای محور y) استفاده شده است. شاخص دقت می‌تواند دو بعدی یا سه بعدی باشد. R95 یک شاخص سه بعدی و وابسته به σ_y/σ_x است، بنابراین خطای موقعیت‌یابی به تفکیک برای صفحه افقی و محور عمودی بیان شده است. با توجه به اینکه شاخص احتمال خطای مدور^۳ (CEP)، از دقت کمتری برخوردار است، از جذر

است و چنانچه ماهواره‌ای در موقعیتی پایین‌تر از این زاویه قرار گیرد، بی‌اثر بوده از این‌رو لازم است بالاتر از این زاویه قرار گیرد تا در موقعیت‌یابی از سیگنال‌های استفاده شود (Leick, 2004). شرایط محیطی مانند نزدیکی به ساختمان‌ها یا پوشش درختان در نزدیکی جنگل‌ها بر روی تعیین این زاویه اثرگذار است. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت اندازه‌گیری، عرض جغرافیایی منطقه مورد مطالعه است. با کاهش عرض جغرافیایی، بایاس GPS در مناطقی با عرض‌های جغرافیایی پایین و متوسط کشور چین افزایش می‌یابد (Zhang et al., 2010).

در تعدادی از پژوهش‌ها مدل‌های موقعیت‌یابی بررسی شده‌اند، به این منظور داده‌های خام یک گیرنده GPS دریافت شده و به کمک این مدل‌ها دقت موقعیت‌یابی افزایش یافته است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل فاز حامل (Tian et al., 2015)، مدل خطای چند مسیری کد C/A (Azarbad & Mosavi, 2014)، مدل یونیسفر (Liu et al., 2018)، مدل ساعت گیرنده (Yang et al., 2014) و مدل شبه‌فاصله (Barros et al., 2001) اشاره کرد. با این وجود پیاده‌سازی این روش‌ها پرهزینه و پیچیده است.

یک راهکار ارزان قیمت و با پیچیدگی کم که قابل پیاده‌سازی در کشورهای کمتر توسعه‌یافته مانند ایران است، از ماهیت خطای GPS که از دو بخش تصادفی و بایاس تشکیل شده است، استفاده می‌کند (Noureldin et al., 2012). این روش شامل دو بخش است. در ابتدا با استفاده از فیلترهای کلاسیک، خطای تصادفی کاهش یافته است و سپس برای کاهش خطای بایاس از یک ایستگاه مرجع که موقعیت آن مشخص است، استفاده شده است. این بخش بر اساس تکنیک DGPS طراحی شده است. برخلاف بیشتر تحقیق‌ها که از داده‌های خام ماژول‌های گیرنده مانند مدت زمان رسیدن سیگنال یا مشخصات سیگنال استفاده می‌کنند، در روش فوق از خروجی گیرنده (مختصات موقعیت) استفاده شده است. روش پیشنهادی، روش موقعیت‌یابی تفاضلی ارزان قیمت^۱ (LCDP) نامیده شده است.

2- National Marine Electronics Association
3- Circular Error Probability

1- Low-Cost Differential Positioning



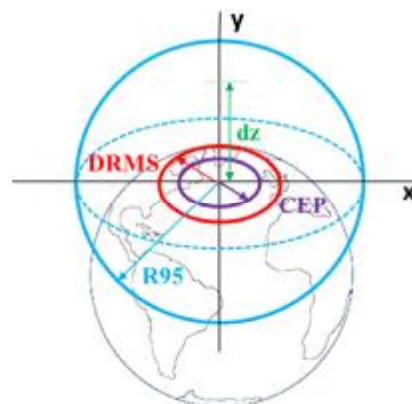
شکل ۲- ستون محل نصب گیرنده‌ها

آزمایش‌ها به دو روش اجرا شده‌اند. در روش اول، سه گیرنده با فاصله یکسان از یکدیگر، در انتهای پره‌ها نصب شده‌اند و در یک شبانه‌روز داده‌برداری انجام شده است. هدف این آزمایش ارزیابی اثر ساعت‌های مختلف یک روز بر روی دقت موقعیت‌یابی است. در روش دوم، آزمایش طی ۶ روز مختلف انجام شده است. هدف این آزمون (اندازه‌گیری موقعیت در ۶ روز مختلف) بررسی اثر روزهای مختلف بر روی دقت موقعیت‌یابی است. این روزها به‌صورت تصادفی در سه ماه متوالی (مهر تا آذر) انتخاب شده‌اند.

روش LCDP

ایستگاه مبنا براساس گیرنده GPS نصب‌شده در آن اصلاحات لازم را ارسال می‌کند. برخلاف اکثر تحقیقات که در آنها از خطاهای شبه‌فاصله یا فاز حامل به عنوان اصلاحات تفاضلی استفاده شده است، در این تحقیق، خروجی نهایی گیرنده‌ها بکار گرفته شده‌اند. به عبارت دیگر، تعیین خطاهای موقعیت‌یابی در سه محور (x, y, z) نیاز به محاسبات پیچیده روش‌های معمول ندارد. با این حال محدوده مسافتی پوشش این روش کاهش کاهش یافته است ولی این محدودیت مشکل زیادی ایجاد نمی‌کند زیرا هدف از بکاربردن این روش استفاده از آن در کشورهای کمتر توسعه‌یافته با زمین‌های کوچک و متوسط است. در مطالعه حاضر از یک گیرنده ارزان قیمت در ایستگاه مبنا و یک گیرنده مشابه در ایستگاه هدف استفاده شده است (شکل ۳). در هر لحظه داده‌برداری، دو داده برای موقعیت گیرنده مبنا و دو داده برای گیرنده هدف در نظر گرفته شده است. یک داده مربوط به موقعیت واقعی گیرنده است که از قبل توسط یک DGPS محاسبه شده و در طول آزمایش ثابت است. داده دیگر مربوط به موقعیت دریافت شده از گیرنده ارزان قیمت است که در حقیقت

مربع میانگین فاصله^۱ (DRMS) استفاده شده است. همچنین تفاضل بین ارتفاع واقعی و تخمین زده‌شده در محور z به عنوان شاخص خطای عمودی انتخاب شده است (شکل ۱).



شکل ۱- شاخص‌های دقت موقعیت‌یابی GPS

تحلیل شرایط اندازه‌گیری

ابتدا دقت موقعیت‌یابی در طی ساعت‌های مختلف روز ارزیابی شده است. همه آزمایش‌ها (با فرکانس یک هرتز) از ساعت ۷ شروع و بعد از ۲۴ ساعت در ساعت ۷ روز بعد اتمام یافته است. در محل داده‌برداری یک ستون ثابت برای استقرار گیرنده‌ها ایجاد شده است. با توجه به اینکه آزمایش‌ها با تکرار همراه بوده‌اند و لازم است چند گیرنده به‌صورت همزمان در مجاورت هم نصب شوند، یک اتصال ۱۲ پره در انتهای ستون قرار گرفته است (شکل ۲). این ستون و اتصال ۱۲ پره به گونه‌ای نصب شده است که کاملاً ثابت است و موقعیت آن در طول زمان تغییر نمی‌کند. موقعیت مرکز بالای ستون و انتهای پره‌ها با دقت کمتر از یک سانتی‌متر با استفاده از یک گیرنده DGPS دو فرکانسه (Leica GX1220 GG, Switzerland) تعیین شده است. براساس استاندارد نصب آنتن دریایی^۲ (Gratton et al., 2011) حداقل فاصله مجاز آنتن‌های گیرنده GPS ۱۵/۲۴ سانتی‌متر است. طول پره‌ها و زاویه بین آنها به گونه‌ای انتخاب شده است که حداقل و حداکثر فاصله بین گیرنده‌ها به ترتیب ۱۷ و ۳۴ سانتی‌متر باشد. در نتیجه فاصله بین گیرنده‌ها از حداقل فاصله مجاز بیشتر است.

1- Distance Root Mean Square

2- Marine Antenna Installations Standard

$$\bar{y}_c = \hat{y}_c + \overline{dy} \quad (۵)$$

$$\bar{z}_c = \hat{z}_c + \overline{dz} \quad (۶)$$

\bar{x}_c ، \bar{y}_c و \bar{z}_c مؤلفه‌های موقعیت اصلاح شده گیرنده هدف و \hat{x}_c ، \hat{y}_c و \hat{z}_c مؤلفه‌های موقعیت گیرنده هدف بعد از فیلتر شدن هستند. آزمایش‌ها با سه تکرار انجام شده‌اند.

در این مطالعه سه روش برای فیلترکردن داده‌های غیردقیق گیرنده‌های ارزان قیمت پیشنهاد شده است. این روش‌ها عبارت‌اند از فیلتر میانگین متحرک^۱ (MAF)، فیلتر پایین‌گذر^۲ (LPF) و فیلتر کالمن^۳ (KF).

ثابت زمانی فیلترها

ثابت زمانی یک پارامتر تاثیرگذار بر روی کارایی فیلتر است. ثابت زمانی مدت زمانی است که پاسخ سیستم به ورودی پله، تقریباً به $0/۶۳$ مقدار نهایی خود برسد (Varmah, 2010). ثابت زمانی کوچک منجر به افزایش سرعت عملکرد و کاهش مشخصه هموارکنندگی فیلتر می‌شود. تعیین ثابت زمانی وابسته به حرکت گیرنده و زمان اولیه راه‌اندازی^۴ است. سرعت کارایی فیلتر در اندازه‌گیری ایستا نسبت به زمانی که گیرنده در حرکت است از اهمیت کمتری برخوردار است. برخی از عملیات کشاورزی دقیق مانند نمونه‌برداری از خاک، نقشه برداری از مزرعه و برخی از انواع نظارت بر محصول می‌تواند به صورت ایستا انجام شود. اما در هر صورت چه در موقعیت‌یابی ساکن چه در حال حرکت، ثابت زمانی بر روی زمان اولیه راه‌اندازی تأثیر می‌گذارد. در این تحقیق، استفاده از یک ثابت زمانی بزرگ که منجر به افزایش زمان اولیه راه‌اندازی می‌شود پیشنهاد شده است. از این‌رو بعد از طی شدن این زمان اولیه، سرعت کارایی فیلتر بهبود می‌یابد. در یک تحقیق بهترین مقدار برای زمان اولیه اندازه‌گیری ۲۱/۷۷ دقیقه گزارش شده است (Sisman, 2014). در پژوهش حاضر زمان ۳۰ دقیقه به عنوان زمان اولیه اندازه‌گیری انتخاب شده است.

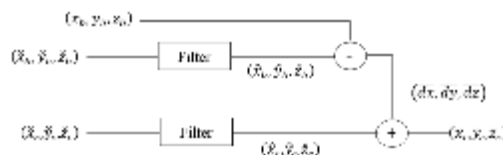
فیلتر پایین‌گذر (LPF) تمام سیگنال‌هایی که بالاتر از یک فرکانس مشخص باشند را حذف کرده و به سیگنال‌های پایین‌تر از آن اجازه عبور می‌دهد (معادله (۷)). کارایی LPF به عنوان یک ابزار هموارساز سیگنال، وابسته به ثابت

موقعیت غیردقیق گیرنده را نشان می‌دهد و با گذشت زمان تغییر می‌کند. نمودار بلوکی LCDP در شکل ۴ نشان داده شده است.

در ابتدا موقعیت غیردقیق خوانده‌شده از گیرنده ایستگاه مبنا فیلتر می‌شود تا خطای تصادفی کاهش یابد و سپس از موقعیت واقعی کسر می‌شود (معادله (۱)). این تفاضل، اصلاحات موقعیت نامیده می‌شود (معادله (۲)) و برای گیرنده ارزان قیمتی که در محدوده ایستگاه مبنا است (گیرنده هدف) ارسال می‌شود. به‌علاوه فیلتر بر روی گیرنده هدف اعمال می‌شود تا خطای تصادفی آن نیز کاهش یابد. جمع اصلاح موقعیت و موقعیت فیلترشده گیرنده هدف، برای به روزرسانی مختصات استفاده شده است (معادله (۳)).



شکل ۳- محل قرارگیری ایستگاه مبنا و هدف



شکل ۴- بلاک دیاگرام LCDP

$$dx = x_b - \hat{x}_b \quad (۱)$$

$$dy = y_b - \hat{y}_b \quad (۲)$$

$$dz = z_b - \hat{z}_b \quad (۳)$$

x_b ، y_b و z_b مؤلفه‌های موقعیت واقعی ایستگاه مبنا در سه محور x ، y و z ، \hat{x}_b ، \hat{y}_b و \hat{z}_b مؤلفه‌های موقعیت مشاهده شده توسط گیرنده مبنا هستند که فیلتر شده‌اند. dx و dy اصلاحات محاسبه‌شده هستند و \hat{x}_b ، \hat{y}_b و \hat{z}_b مؤلفه‌های موقعیت مشاهده شده در گیرنده ارزان قیمت ایستگاه مبنا را قبل از فیلتر شدن در شکل ۲ نشان می‌دهند. مؤلفه‌های موقعیت اصلاح‌شده در معادله‌های (۴) تا (۶) محاسبه شده‌اند.

$$\bar{x}_c = \hat{x}_c + \overline{dx} \quad (۴)$$

1- Moving Average Filter

2- Low-Pass Filter

3- Kalman Filter

4- Initializing Time

نشان داده شده، فرآیند پیش‌بینی است (Bulut et al., 2010).

$$\hat{x}_{p|k} = A\hat{x}_{k-1} \quad (11)$$

$$P_{p|k} = AP_{k-1}A^T + Q \quad (12)$$

زیرنویس k هر لحظه از فرآیند و زیرنویس p مقدار پیش‌بینی‌شده را بیان می‌کند. A و Q در این مرحله مدل سیستم را نشان می‌دهند. P کواریانس خطا و Q کواریانس نویز فرآیند است. ورودی‌های مرحله پیش‌بینی، تخمینی هستند و کواریانس خطا از لحظه قبلی تعیین شده است. دومین مرحله فرآیند تخمین است که در معادله‌های (۱۳) الی (۱۵) ارائه شده است (Bulut et al., 2010).

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{p|k} + K_k(y_k - H\hat{x}_{p|k}) \quad (13)$$

$$K_k = P_{p|k}H^T(HP_{p|k}H^T + R)^{-1} \quad (14)$$

$$P_k = P_{p|k} - K_kHP_{p|k} \quad (15)$$

K_k حسایت کالمن است. H و R پارامترهای مدل سیستم در این مرحله هستند. R نویز اندازه‌گیری و H ماتریس مشاهده است. ورودی‌های این مرحله داده‌های مشاهده شده و تخمین زده‌شده و کواریانس خطا است. این دو مرحله به صورت یک حلقه تکرار می‌شوند.

Q و R از طریق یک آزمون ۲۴ ساعته محاسبه شده‌اند. انحراف معیار خطای موقعیت‌یابی در سه محور مختصات به عنوان R استفاده شده که برابر با $3/5$ متر است. فرض شده است که R نامتغیر باشد. Q از طریق معادله (۱۹) (Etzion, 2015) محاسبه شده است:

$$Q = \frac{dt\sigma^2}{\tau^4} \quad (19)$$

dt نرخ نمونه برداری، σ انحراف معیار خطای موقعیت‌یابی و τ ثابت زمانی است. با ثابت زمانی که در LPF و MAF (۱۸۰۰ ثانیه) انتخاب شده است، Q برابر با $1/16 \times 10^{-12}$ به دست آمده است.

هموارسازی (α) است. معادله (λ) ثابت هموارسازی را محاسبه می‌کند (Young, 2012). در این معادله τ ثابت زمانی و dt نرخ نمونه‌گیری است. نرخ نمونه‌گیری گیرنده GPS در این تحقیق یک هرتز انتخاب شده است.

$$\hat{x}_k = (1 - \alpha)\hat{x}_{k-1} + \alpha\check{x}_k \quad (7)$$

زیرنویس k اشاره به هر لحظه از این فرآیند دارد. \hat{x} موقعیت تخمین زده‌شده و \check{x} موقعیت مشاهده شده است.

$$\alpha = \frac{dt}{dt + \tau} \quad (8)$$

فیلتر میانگین متحرک (MAF) یک فیلتر پایین‌گذر معمولی است که از M نمونه در زمان آزمون میانگین می‌گیرد و خروجی موردنظر را در این بازه زمانی به دست می‌آورد (Smith, 2003). در معادلات (۹) و (۱۰)، نمونه‌ها برای میانگین‌گیری از نمونه لحظه t_k شروع و در $M-1$ امین نمونه بعدی پایان می‌یابد. t_k لحظه جاری فرآیند میانگین‌گیری است. این فاصله زمانی برابر با $i = -(M-1)/2$ تا $(M-1)/2$ است. پس از این برای اختصار تنها از مؤلفه x موقعیت استفاده شده است. همانطور که در بالا اشاره شده است، ثابت زمانی ۳۰ دقیقه انتخاب‌شده در نتیجه ۱۸۰۰ نمونه برای M انتخاب شده است.

$$\hat{x}_k = \frac{\check{x}_k + \check{x}_{k+1} + \dots + \check{x}_{k+(M-1)}}{M} \quad (9)$$

$$\hat{x}_k = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \check{x}_{k+i} \quad (10)$$

در فیلتر کالمن (KF) ساده، سیستم توسط یک مدل فضا حالت خطی بیان شده است. حالت این مدل از طریق اندازه‌گیری‌هایی که شامل نویز هستند تخمین زده می‌شود. در این تحقیق تنها یک ورودی (موقعیت اندازه‌گیری‌شده، y_k) و یک خروجی (موقعیت تخمین زده‌شده، \hat{x}_k) وجود دارد. الگوریتم پیشنهادی دو مرحله اصلی دارد. اولین مرحله که در معادله‌های (۱۱) و (۱۲)

جدول ۲- شاخص‌های دقت موقعیت‌یابی GPS (Ogaja, 2016)

فرمول	تعریف	شاخص دقت
$\sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_x^2}$	ریشه دوم میانگین مربع خطاهای افقی موقعیت	DRMS
$0.62\sigma_y + 0.56\sigma_x$	شعاع دایره‌ای که مرکز آن موقعیت صحیح بوده و شامل موقعیت‌های تخمین زده‌شده با احتمال ۵۰٪ است.	CEP ^a
$R(0.62\sigma_y + 0.56\sigma_x)$	شعاع دایره‌ای که مرکز آن در موقعیت صحیح بوده و شامل موقعیت‌های تخمین زده‌شده با احتمال ۹۵٪ است.	R95 ^b

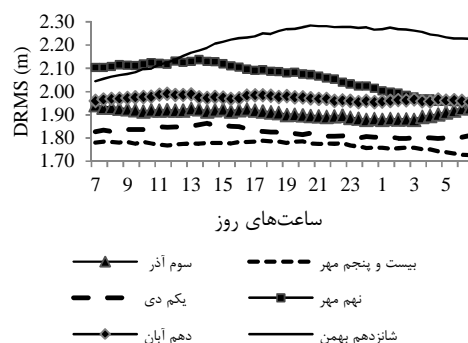
^a زمانی دقیق است که $\sigma_y/\sigma_x > 0.3$

^b زمانی که $\sigma_y/\sigma_x = 1$ ، $R=2.08$

نتایج و بحث

تست نرمال‌یته بر روی همه داده‌ها انجام شده است و نتایج نشان می‌دهد که داده‌ها توزیع غیرگوسی دارند. در نتیجه برای مقایسه میانگین‌ها، از آنالیز واریانس یک راهه کروسکال-والیس^۱ در همه آزمایش‌های این تحقیق استفاده شده است.

آزمون کروسکال-والیس با سه تکرار در یک شبانه روز کامل با میانگین‌گیری از داده‌های هر نیم ساعت بر روی DRMS ساعت‌های مختلف یک روز معنادار نبوده است ($p=1$). در نتیجه، آزمایش‌های روش پیشنهادی را می‌توان بدون در نظر گرفتن ساعت شبانه روز انجام داد. نتایج اندازه‌گیری شش روز (انتخاب شده به طور تصادفی در سه ماه مهر تا آذر) در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۵- تغییر DRMS در طول ۲۴ ساعت شبانه روز

تفاوت معناداری براساس نتایج آزمون کروسکال-والیس بین روزهای اندازه‌گیری وجود داشته است ($p=0.005$). به طوری که DRMS بیشینه و کمینه به ترتیب برابر با ۱/۷۷ و ۲/۴۵ متر به دست آمده است. تعمیم نتایج در این مقاله وابسته به نتایج این بخش و بخش قبلی است. با توجه به اینکه نتایج روزهای مختلف متفاوت است، در نتیجه اعداد گزارش شده در این گزارش قابل تعمیم نیست و برای نشان دادن اثربخشی روش پیشنهادی به جای کاهش خطای موقعیت‌یابی، درصد کاهش خطا بیان شده است.

نتایج مقایسه (بر اساس شاخص‌های مختلف خطا) برای روش‌های مختلف فیلترکردن در جدول ۴ نشان داده شده است. بالاترین مقدار خطا مربوط به حالتی است که از فیلتر استفاده نشده است (شاهد). همانطور که مشاهده

می‌شود تمام روش‌های فیلترکردن منجر به کاهش خطا شده‌است. بیشترین میزان کاهش خطا در فیلتر کالمن و به میزان ۷۸٪ رخ داده‌است. LPF و MAF می‌توانند DRMS را به ترتیب ۵۵٪ و ۴۳٪ کاهش دهند. شاخص دیگر خطا در جدول ۴ میانگین تفاضل بین موقعیت واقعی و موقعیت تخمین زده شده در محور z (dz) در طول ۲۴ ساعت است. کاهش dz برای فیلترهای KF، LPF و MAF به ترتیب برابر ۳۳٪، ۳۱٪ و ۲۴٪ است. در حقیقت تفاوت چندانی در عملکرد فیلترها برای کاهش dz مشاهده نشده است.

با توجه به برتری عملکرد KF بر سایر فیلترها، بررسی روش پیشنهادی (جدول ۵) و نمودارهایی که در ادامه نشان داده شده‌اند، بر اساس کاربرد KF است. بعد از اعمال اصلاحات به خروجی فیلتر کالمن، مقدار DRMS و dz به ترتیب ۸۹٪ و ۲۶٪ کاهش یافته‌است. LCDP در کاهش خطای عمودی تأثیر چندانی نداشته است که با توجه به اهمیت بیشتر خطای سطح افقی این موضوع نادیده گرفته شده است.

جدول ۴- مقایسه روش‌های مختلف فیلترکردن

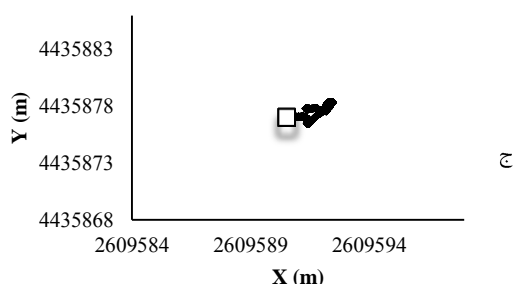
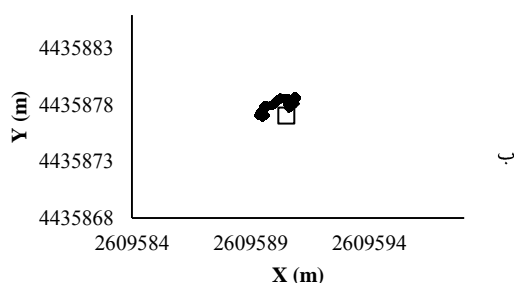
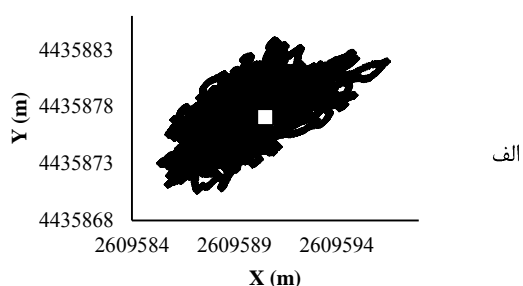
شاخص خطا	شاهد	KF	LPF	MAF
DRMS (m)	۲/۲۶	-۰/۴۷	۱/۰۰	۱/۲۸
dz (m)	۱/۴۶	-۰/۹۷	۱/۰۰	۱/۰۹

جدول ۵- عملکرد روش پیشنهادی در کاهش خطا

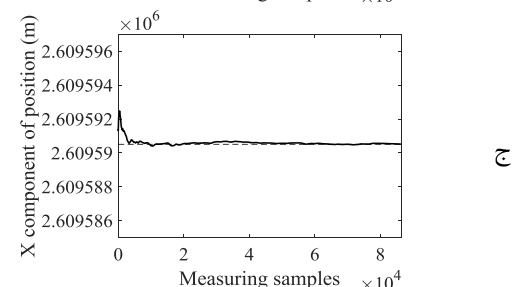
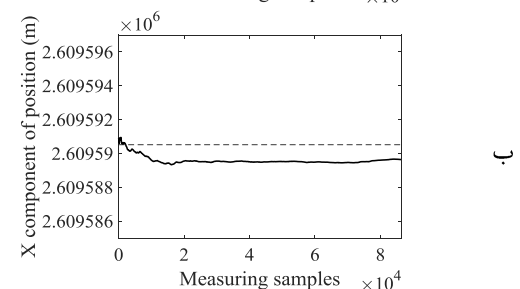
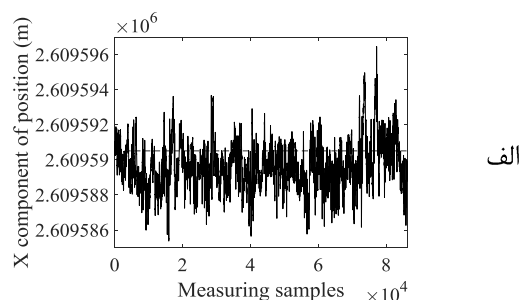
شاخص خطا	LCDP	
	مقدار شاهد (m)	مقدار (m) درصد کاهش
DRMS	۲/۲۶	-۰/۲۴ ۸۹٪
dz	۱/۴۶	۱/۰۸ ۲۶٪

شکل ۶ مؤلفه x موقعیت بدون فیلترشدن، بعد از فیلترشدن و بعد از اعمال اصلاحات را در طی ۲۴ ساعت نمایش داده‌است. روش فیلترکردن داده‌ها در این شکل استفاده از فیلتر KF است. شکل ۶- الف موقعیت دریافت شده از گیرنده ارزان قیمت هدف را نشان می‌دهد. این اندازه‌گیری رفتاری تصادفی دارد. مقدار واقعی موقعیت با خط تیره در شکل‌ها نشان داده شده است. بعد از اعمال فیلتر KF، تغییرات خطای تصادفی به صورت معناداری کاهش یافته است (شکل ۶- ب). نتایج نشان می‌دهد که یک بایاس در داده‌ها وجود دارد. این بایاس نیز توسط اصلاحات دریافتی از ایستگاه مبنا به صورت معناداری کاهش یافته است (شکل ۶- ج).

خطای تصادفی ناموفق بوده‌اند. از این‌رو این شاخص تنها برای خروجی KF بررسی شده است. فاصله بین موقعیت فیلترشده و اصلاح‌شده، با موقعیت واقعی در هر لحظه (D) به عنوان شاخص خطا انتخاب شده است (شکل ۸). زمان نشست برای D معادل با یک متر ۱۰۲۴ ثانیه (تقریباً ۲۰ دقیقه)، D معادل با ۰/۵ متر ۲۴۰۰ ثانیه (۴۰ دقیقه) و D معادل با ۰/۳ متر ۷۳۵۹۲ ثانیه (تقریباً ۲۰/۵ ساعت) است. در نتیجه، با LCDP، بعد از ۴۰ دقیقه آماده‌سازی اولیه، به دقت زیر ۰/۵ متر می‌توان رسید. در حالی‌که اکثر عملیات کشاورزی دقیق که مرتبط با خصوصیات خاک است، نیاز به دقت‌های بالای یک متر دارد (Rudolph et al., 2018).



شکل ۷- تغییرات موقعیت (در صفحه x,y) نسبت به موقعیت واقعی، در طی ۲۴ ساعت داده‌برداری در دستگاه مختصات جغرافیایی الف) داده خام دریافت‌شده. ب) داده هموارشده توسط KF. ج) کاهش بایاس توسط اصلاحات ارسالی از ایستگاه مینا



شکل ۶- تغییرات مؤلفه x موقعیت در طی ۲۴ ساعت داده‌برداری در دستگاه مختصات زمین-مرکز، زمین ثابت (ECEF). الف) داده خام دریافت‌شده. ب) داده هموارشده توسط KF. ج) کاهش بایاس توسط اصلاحات ارسالی از ایستگاه مینا

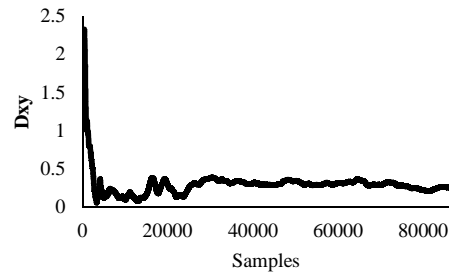
شکل ۷- الف نتایج موقعیت‌یابی گیرنده ارزان قیمت را در حالت دو بعدی نشان می‌دهد. در این شکل موقعیت واقعی با یک مربع نشان داده شده است. داده خام دریافت‌شده از گیرنده ارزان قیمت صحت^۱ کمی داشته است (مجموعه داده‌ها از مقدار واقعی فاصله دارند) و دقت^۲ کمی نیز دارد (داده‌ها پراکندگی بالایی دارند). بعد از فیلترکردن دقت افزایش یافته است (شکل ۷- ب) و صحت داده‌ها نیز بعد از اعمال اصلاحات دریافتی از ایستگاه مینا افزایش یافته‌اند (شکل ۷- ج).

شاخص دیگری که مورد ارزیابی قرار گرفته است، مدت زمان لازم برای رسیدن به یک باند خطای مطمئن است. این شاخص با الهام از تئوری کنترل، زمان نشست نامیده شده است (Ogata, 2010). LPF و MAF در کاهش

سانتی‌متر برسد. دقت LCDP برای کاربرد در تعدادی از عملیات کشاورزی دقیق در کشورهای کمتر توسعه‌یافته مناسب است.

منابع

1. Asadi, V., & Maghsoudi, H. (2020). Yield Mapping in a pistachio orchard with evaluation of a designed measurement system for manual harvesting (A case study: Manzel-Abad district of Shahr-e Babak). *Journal of Researches in Mechanics of Agricultural Machinery*, 9(1): 55-65.
2. Azarbad, M. R., & Mosavi, M. R. (2014). A new method to mitigate multipath error in single-frequency GPS receiver with wavelet transform. *GPS Solutions*, 18(2): 189-198.
3. Barros, M. S. S., Rosa, L. C. L., Walter, F., & Méndez, D. (2001). GPS: Statistical models to reproduce the pseudoranges in different scenarios and their reliability evaluation. *Advances in Space Research*, 28(1): 227-232.
4. Borgelt, S. C., Harrison, J. D., Sudduth, K. A. & Birrell, S. J. (1996). Evaluation of GPS for application in precision farming. *Applied Engineering in Agriculture*, 12(6), 633-638.
5. Bulut, Y., Vines-Cavanaugh, D., & Bernal, D. (2010). Process and Measurement Noise Estimation for Kalman Filtering. *the 3th Conference Proceeding of the Society for Experimental Mechanics Series*. Jacksonville, Florida USA.
6. Etzion J. (2015). Steady-State Time Constant of the Kalman Filter. In: Choukroun D., Oshman Y., Thienel J., Idan M. (eds) *Advances in Estimation, Navigation, and Spacecraft Control*. Springer, Berlin, Heidelberg.
7. Gratton, D., Beach, M. P., Lindstrom, J. & Shipyard, W. (2011). Marine Antenna Installations. Homepage National Marine Electronics Association <http://nmea.org>. Accessed 16 October 2016
8. Holden, N. M., Comparetti, A., Ward, S. M., & McGovern, E. A. (1999). Accuracy assessment and position correction for low-cost non-differential GPS as applied on an industrial peat bog. *Computers and Electronics in Agriculture*, 24(3): 119-130.
9. Hu, G. R., Khoo, H. S., Goh, P. C., & Law, C. L. (2003). Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning. *Journal of Geodesy*, 77(5): 292-302.
10. Keskin, M., Sekerli, Y. E., & Kahraman, S. (2017). Performance of two low-cost GPS receivers for ground speed measurement



شکل ۸- تغییرات شاخص خطا (اختلاف بین موقعیت فیلتر و اصلاح شده، با موقعیت واقعی در هر لحظه در طی ۲۴ ساعت

نتیجه‌گیری

تحلیل شرایط اندازه‌گیری با هدف بررسی میزان تعمیم‌پذیری نتایج انجام شده است و بیانگر آنست که زمان اندازه‌گیری (ساعت‌های مختلف شبانه‌روز) تأثیر معناداری بر روی خطا ندارد در نتیجه روش پیشنهاد شده می‌تواند در هر ساعت از شبانه‌روز مورد استفاده قرار گیرد. با این حال خطای موقعیت‌یابی در روزهای مختلف متفاوت است که در نتیجه به جای مقدار عددی دقت به دست آمده، بر درصد کاهش خطا تاکید شده است. نتایج به دست آمده از تحلیل شرایط اندازه‌گیری نشان می‌دهد که شرایط برای بررسی LCDP و اعلام قابلیت‌های آن امکان‌پذیر است. قابلیت سه فیلتر KF، LPF و MAF در کاهش خطای موقعیت‌یابی ارزیابی شده است و نشان می‌دهد KF بهترین عملکرد را در بین فیلترها دارد. نتایج نمونه‌برداری از موقعیت گیرنده‌ها در طی شبانه‌روز نمایانگر وجود بایاس در اندازه‌گیری‌ها است. روش کاهش خطای پیشنهادی از یک ایستگاه مبنا با یک گیرنده بر روی آن استفاده کرده است. تصحیحات ایستگاه مبنا در LCDP منجر به کاهش ۵۰٪ خطای موقعیت خروجی از KF شده است. با این وجود این روش در کاهش خطای عمودی ناموفق است. زمان نشست که مدت زمان لازم برای رسیدن به یک دقت مطمئن است به عنوان یک شاخص دیگر برای ارزیابی کارایی LCDP بررسی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج به دست آمده برای آزمایش یک روز کامل نشان داده است که باند خطا با افزایش زمان نشست کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در کمتر از یک ساعت باند خطا به کمتر از ۴۰ سانتی‌متر رسیده است. با این وجود این رابطه غیرخطی است از این رو حدود ۲۰ ساعت زمان نیاز است تا به دقت کمتر از ۳۰

25. Yang, Y., Yue, X., Yuan, J., & Rizos, C. (2014). Enhancing the kinematic precise orbit determination of low earth orbiters using GPS receiver clock modelling. *Advances in Space Research*, 54(9): 1901-1912.
26. Yao, H., & Clark, R. L. (2000). Evaluation of Sub-Meter and 2 to 5 Meter Accuracy GPS Receivers to Develop Digital Elevation Models. *Precision Agriculture*, 2(2): 189-200.
27. Young, P. C. (2012). *Recursive Estimation and Time-Series Analysis. An Introduction*: Springer Berlin Heidelberg.
28. Zhang, D. H., Zhang, W., Li, Q., Shi, L. Q., Hao, Y. Q., & Xiao, Z. (2010). Accuracy analysis of the GPS instrumental bias estimated from observations in middle and low latitudes. *Annales Geophysicae*, 28(8): 1571-1580.
- under varying speed conditions. *Precision Agriculture*, 18(2): 264-277.
11. Leick, A. (2004). *GPS Satellite Surveying*. Wiley, New York.
12. Liu, T., Zhang, B., Yuan, Y., & Li, M. (2018). Real-Time Precise Point Positioning (RTPPP) with raw observations and its application in real-time regional ionospheric VTEC modeling. *Journal of Geodesy*, 92: 1267-1283.
13. Noureldin, A., Karamat, T. B., & Georgy, J. (2012). *Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and their Integration*. Springer Berlin Heidelberg.
14. Ogaja, C. A. (2016). *Geomatics Engineering: A Practical Guide to Project Design*. CRC Press, Florida.
15. Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering*. Prentice Hall.
16. Pérez-Ruiz, M., Carballido, J., Agüera, J., & Gil, J. A. (2011). Assessing GNSS correction signals for assisted guidance systems in agricultural vehicles. *Precision Agriculture*, 12(5): 639-652.
17. Peters, R. T., & Evett, S. R. (2005). Using low-cost GPS receivers for determining field position of mechanized irrigation systems. *Applied Engineering in Agriculture*, 21(5): 841-845.
18. Rovira-Más, F., Chatterjee, I., & Sáiz-Rubio, V. (2015). The role of GNSS in the navigation strategies of cost-effective agricultural robots. *Computers and Electronics in Agriculture*, 112: 172-183.
19. Rudolph, S., Marchant, B. P., Weihermüller, L., & Vereecken, H. (2018). Assessment of the position accuracy of a single-frequency GPS receiver designed for electromagnetic induction surveys. *Precision Agriculture*, 20: 19-39.
20. Sisman, Y. (2014). The optimization of GPS positioning using response surface methodology. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(3): 1223-1231.
21. Sisman, Y., Elevli, S., & Sisman, A. (2014). A statistical analysis of GPS positioning using experimental design. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 49(3): 343-355.
22. Smith, S. W. (2003). *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. Newnes.
23. Tian, Y., Ge, M., & Neitzel, F. (2015). Particle filter-based estimation of inter-frequency phase bias for real-time GLONASS integer ambiguity resolution. *Journal of Geodesy*, 89(11): 1145-1158.
24. Varmah, K. R. (2010). *Control Systems*. McGraw Hill.