

افزایش دقت ردیابی برداری سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) در شرایط سیگنال ضعیف مبتنی بر فیلتر کالمن تطبیقی ردیاب قوی

میلاذ انارفرهاد^۱، سید محمدرضا موسوی میرکلایی^{۲*}، علی اصغر عابدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استاد، ۳- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۹۴/۱۲/۲۲، پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۰)

چکیده

در این مقاله یک روش جدید برای ردیابی برداری سیگنال ماهواره‌های GPS در شرایطی که سیگنال ضعیف می‌باشد، ارائه شده است. در ردیابی برداری معمولاً از فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF) استفاده می‌شود. یکی از مشکلات فیلتر کالمن مرسوم، واگرایی آن است. برای جلوگیری از واگرایی فیلتر کالمن، از فیلتر کالمن تطبیقی استفاده می‌شود. روش مرسوم تطبیقی کردن فیلتر کالمن در ردیابی برداری، استفاده از پنجره‌ای با طول محدود می‌باشد اما طول این پنجره نمی‌تواند از یک حدی بزرگتر باشد و از طرفی، بعد از گذشت مدت زمانی اندک، فیلتر کالمن دوباره واگرا می‌شود. همچنین، طول پنجره به صورت تجربی و با توجه به خصوصیات آماری تعیین می‌شود که ممکن است به ازای یک مقدار خاص جواب ایده‌آل حاصل شود و به ازای یک مقدار دیگر چنین نشود. از این رو، در این مقاله از فیلتر کالمن تطبیقی ردیاب قوی (STKF) استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که STKF تطبیقی نسبت به EKF تطبیقی در ردیابی برداری از دقت بالاتری برخوردار بوده و همچنین در صورتی که پارامترهای STKF به درستی تنظیم شوند، پیچیدگی محاسباتی ردیابی برداری پیشنهادی کمتر از روش مرسوم خواهد بود. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که در ردیابی برداری مبتنی بر STKF تطبیقی نسبت به ردیابی برداری مرسوم، خطای اندازه‌گیری فرکانس حامل، خطای اندازه‌گیری موقعیت و سرعت به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.

کلید واژه‌ها: GPS، ردیابی برداری، فیلتر کالمن ردیاب قوی، سیگنال ضعیف

۱- مقدمه

ورودی GPS^۶ است. توان سیگنال GPS قابل دستیابی در پایانه‌های خروجی آنتن گیرنده به شدت پایین است و به راحتی توسط تداخل دیگر سیگنال‌های با توان بیشتر از بین می‌رود. لذا برای این که سیگنال ورودی در طبقات بعدی قابل استفاده باشد، نیاز به تقویت سیگنال RF در حدود ۴۵ تا ۵۵ دسی‌بل می‌باشد. پس از ورود سیگنال دیجیتال از بخش سرچلویی، فرآیند استخراج داده‌های ناوبری آغاز می‌شود. وظیفه واحد اکتساب پیدا کردن یک ماهواره و تخمین مقدار تاخیر کد و شیفت داپلر است. بخش اکتساب، برآوردهایی با دقت کم از پارامترهای فرکانس و فاز کد فراهم می‌آورد. هدف اصلی از ردیابی، پالایش مقادیر تقریبی از این مقادیر و ردیابی آن‌ها است. ردیابی شامل دو بخش ردیابی حامل و ردیابی کد می‌شود. در ردیابی حامل، فرکانس حامل را با استفاده از حلقه‌های ردیابی قفل فرکانس (FLL^۷) یا حلقه‌های ردیابی قفل فاز (PLL^۸) ردیابی می‌کنند و

سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای (GNSS^۱) جزو ضروری‌ترین فناوری‌های امروزی به حساب می‌آیند، چرا که کاربرد GNSS در ابعاد مختلف صنعت، زندگی شهری، کاربردهای نظامی و پژوهش‌های علمی غیرقابل انکار است. پژوهش‌ها جهت بهبود عملکرد این سامانه‌ها روز به روز با توجه به شناخت اهمیت GNSS افزایش یافته‌اند. جهت بهبود عملکرد در قسمت گیرنده‌های ناوبری ماهواره‌ای، تحقیقات زیادی انجام شده است. یک گیرنده GNSS دارای چهار قسمت اصلی سرچلویی^۲، اکتساب^۳، ردیابی^۴ و حل معادلات ناوبری^۵ است [۱]. شکل (۱) ساختار کلی یک گیرنده اسکالر سامانه ناوبری را به نمایش می‌گذارد. هدف از بخش سرچلویی، فیلتر کردن و تقویت سیگنال

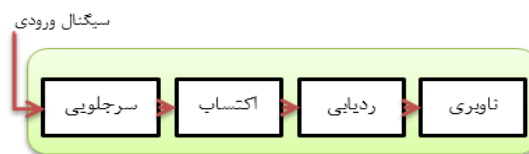
* رایانامه نویسنده مسئول: M_Mosavi@iust.ac.ir

1- Global Navigation Satellite System
2- Front_End
3- Acquisition
4- Tracking
5- Navigation

6- Global Positioning System
7- Frequency Lock Loop
8- Phase Lock Loop

کانال‌های دیگر، می‌تواند ردیابی و سرانجام موقعیت‌یابی را انجام دهد. اولین راه‌حل برای ردیابی برداری توسط Spilker [۳] با عنوان حلقه برداری قفل تاخیر (VDLL^۴) مطرح شد. جزییات بیشتر در مورد ردیابی برداری و همچنین انتگرال‌گیری در عمق توسط Pany، Kaniuth و Eissfeller [۴-۶] بررسی شد. در این بررسی‌ها با استفاده از گیرنده نرم‌افزاری Ipx، ردیابی برداری پیاده‌سازی شده است. در ادامه Eissfeller، Dotterbock و Won [۷] عملکرد ردیابی برداری را در محیط‌های با محوشدگی^۵، مورد ارزیابی قرار دادند. در ادامه Lashley، Bely و Hung [۸] از دانشگاه Auburn کارهای زیادی را در زمینه پیاده‌سازی گیرنده‌های برداری انجام داده‌اند. آن‌ها هم VDLL و هم VDFLL را پیاده‌سازی کردند و عملکرد این روش‌ها را در محیط‌های مختلف آزمایش نمودند. Zhao و Akos [۹] حلقه‌های ردیابی برداری را در گیرنده‌های نرم‌افزاری با بستر MATLAB پیاده‌سازی کردند و در محیط‌های مختلف بررسی نمودند. در سال‌های اخیر نیز تحقیقات فراوانی برای بهبود گیرنده‌های برداری به انجام رسیده است. Jing گیرنده‌های برداری مبتنی بر تخمین گر ML را معرفی کرد [۱۰]. از جمله ایرادهای این روش حجم محاسباتی بالای آن بود. Li-Ta Hsu کاهش چندمسیری و تشخیص NLOS با استفاده از حلقه‌های برداری را مورد آزمایش قرار داده است [۱۱]. همچنین، در ادامه گیرنده‌های برداری روی سامانه‌های تلفیقی GPS و INS توسط آقای Zhao معرفی شد [۱۲]. پس از آن، گیرنده‌های چندگانه برداری روی بستر پایتون توسط Yuting منتشر شد [۱۳]. همچنین، گیرنده‌های برداری روی سامانه‌های تلفیقی GPS و BDS معرفی شدند [۱۴] و در ادامه حلقه‌های ردیابی برداری در گیرنده‌های چندآنتنه توسط Cuntz مورد آزمایش قرار گرفت [۱۵]. Zhaoyan حلقه‌های برداری را همراه با حذف کانال‌های مخرب معرفی کرد [۱۶]. همچنین، حلقه‌های برداری برای کاربرد مقابله با جمینگ توسط Fusheng منتشر شده است [۱۷]. اخیراً طباطبایی گیرنده‌های برداری روی سامانه تلفیقی GPS و GLANOSS معرفی کرده است [۱۸]. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های مختلفی در حوزه ردیابی برداری انجام شده است. همه این پژوهش‌ها از EKF^۷ به‌عنوان قلب روش برداری بهره برده‌اند، اما EKF در شرایط بسیار نامناسب نمی‌تواند پایدار بماند. به‌همین دلیل، حلقه‌های ردیابی از قفل باز می‌شوند و ناوبری انجام نمی‌شود. از این‌رو، در پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه ردیابی برداری از EKF تطبیقی استفاده می‌کنند. روش مرسوم تطبیقی کردن EKF، استفاده از پنجره‌ای با طول محدود می‌باشد. اما طول این پنجره نمی‌تواند از یک حدی بزرگتر باشد و نیز

در ردیابی کد از حلقه‌های ردیابی قفل تاخیر (DLL^۱) استفاده می‌شود. سرانجام در قسمت ناوبری با توجه به نتایج ردیابی، موقعیت، سرعت و زمان کاربر توسط فیلتر ناوبری به‌دست می‌آید [۱-۲]. یکی از مشکلات اساسی گیرنده‌ها در دریافت و ردیابی سیگنال‌های ارسالی ماهواره‌ها، ضعیف‌بودن این سیگنال‌ها است. از این‌رو، محققان در قسمت‌های مختلف گیرنده برای رفع این مشکل، تلاش‌های فراوانی کردند. از آنجا که ماهواره‌های این سامانه‌ها در ارتفاع ۲۰۰۰۰ کیلومتری از سطح زمین قرار دارند، سیگنال‌های ارسالی از آن‌ها به هنگام رسیدن به سطح زمین بسیار ضعیف و دارای سطح توان پایینی خواهند بود. اما علاوه بر این، سیگنال ارسالی طی شرایطی، ضعیف‌تر نیز می‌شود که برخی از این شرایط عبارتند از: قرارگرفتن گیرنده‌ها در محیط‌های با نویز بالا، قرارگرفتن گیرنده‌ها در موقعیت‌های با دینامیک بالا مانند وسایل نقلیه، قرارگرفتن گیرنده‌ها در موقعیت شهری که کاهش سطح توان سیگنال در اثر پدیده چندمسیری اتفاق می‌افتد و قرارگیری گیرنده‌ها در مکان‌های خاص مثل کنار دیوارها، زیرزمین، جنگل، رودخانه و غیره.



شکل (۱): ساختار کلی گیرنده GPS

برای مقابله با مشکل سیگنال ضعیف در بخش ردیابی، تحقیقات فراوانی از جمله ردیابی برداری انجام شده است. از کاربردهای نظامی روش برداری می‌توان به موقعیت‌یابی نیروها و تجهیزات نظامی در شرایط خاص مثل کوهستان، جنگل، تونل، غار و غیره اشاره کرد. البته ردیابی برداری در شرایط فریب و Jamming نیز کارا بوده و می‌تواند گیرنده را در مقابل این نوع از اختلال‌ها مقاوم کند. قلب ردیابی برداری، فیلتر کالمن است. بنابراین، برای ردیابی سیگنال‌های GPS در حالت کلی دو روش ردیابی اسکالر (STL^۲) و ردیابی برداری (VTL^۳) را می‌توان در نظر گرفت. در ردیابی اسکالر، سیگنال از ماهواره‌های مختلف در کانال‌های متناظر به‌صورت مستقل ردیابی می‌شود. اما در ردیابی برداری، سیگنال از ماهواره‌های مختلف در فیلتر ناوبری سیگنال با هم ردیابی می‌شوند. در واقع، در حلقه‌های ردیابی اسکالر یا به عبارتی همان حلقه‌های ردیابی سنتی، تمام کانال‌ها به‌صورت جداگانه و مستقل ردیابی می‌شود. اما در ردیابی برداری استقلال بین کانال‌ها از بین رفته است. به همین دلیل است که وقتی سیگنال ضعیف می‌شود، گیرنده با توجه به اطلاعات

4- Vector Delay/Frequency Locked Loop

5- Fading

6- Vector Delay/Frequency Locked Loop

7- Extended Kalman Filter

1- Delay Lock Loop

2- Scaler Tracking Loop

3- Vector Tracking Loop

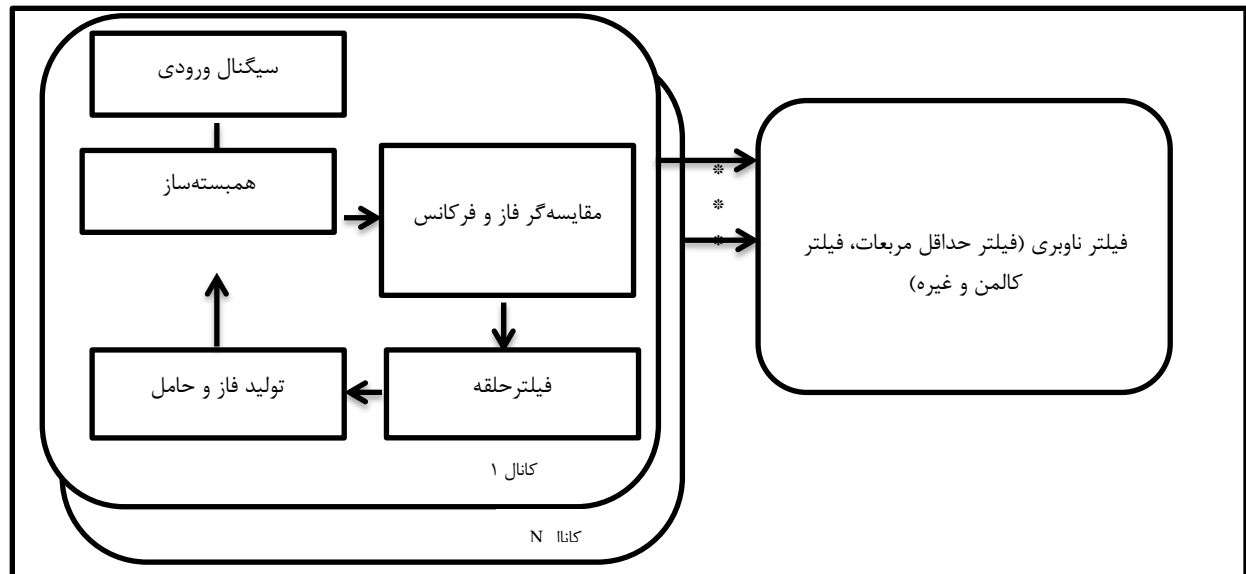
و تولید اندازه‌گیری شبه‌فاصله و نرخ شبه‌فاصله را انجام می‌دهد. در حالی که NPU از این اندازه‌گیری‌ها برای موقعیت‌یابی، ناوبری و محاسبه زمان استفاده می‌کند. در ردیابی اسکالر، سیگنال از ماهواره‌های مختلف در کانال‌های متناظر به‌صورت مستقل ردیابی می‌شود. هر کانال شامل یک DLL برای ردیابی کد و یک PLL برای ردیابی حامل است. شبه‌فاصله و نرخ شبه‌فاصله در انتهای زمان تجمعی همبستگی هر کانال تولید می‌شود. سپس NPU تمام شبه‌فاصله‌ها و نرخ شبه‌فاصله‌ها را برای محاسبه موقعیت، سرعت و زمان (PVT^۴) دریافتی با هم ترکیب می‌کند. دقت گیرنده به عملکرد جداگانه هر کانال وابسته است. در ردیابی برداری، سیگنال از ماهواره‌های مختلف در فیلتر ناوبری سیگنال با هم ردیابی می‌شوند. SPU و NPU در هرکدام از فیلترهای ناوبری در کنار هم هستند، بنابراین، بین پردازش سیگنال پردازش ناوبری در این روش مرزی وجود ندارد. از بین بردن مرز بین SPU و NPU می‌تواند گیرنده را در مقابل با سیگنال‌های ضعیف و تداخل مقاوم کند. در واقع، در ردیابی برداری، گیرنده با استفاده از سیگنال‌های قوی پیشین، قادر به ردیابی سیگنال‌های ضعیف خواهد بود [۱۹-۲۱]. اشکال (۲-۳) به‌ترتیب ساختار کلی حلقه‌های ردیابی اسکالر و برداری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در اشکال مشخص است، در گیرنده‌های برداری برخلاف گیرنده‌های سنتی بین پردازش سیگنال و پردازش ناوبری مرزی وجود ندارد و در این حالت ردیابی تمام کانال‌ها و موقعیت‌یابی به‌طور همزمان انجام می‌شود. به همین دلیل، در ردیابی برداری می‌توان از کانال‌هایی که کمتر نویزی شده‌اند برای جبران سیگنال ضعیف دیگر کانال‌ها استفاده کرد.

مقدار این طول به‌صورت تجربی و با توجه به خصوصیات آماری تعیین می‌شود. بنابراین، ممکن است به ازای یک مقدار خاص، EKF پایدار بماند اما به ازای یک مقدار دیگر، پایدار نماند. در ردیابی برداری اگر خطایی در فیلتر کالمن رخ دهد و یا ناپایداری در آن به‌وجود بیاید، آن خطا و ناپایداری به‌سرعت منتشر می‌شود و درجه ناپایداری را بسیار بدتر می‌کند. چراکه خطای موقعیت و سرعت در هر مرحله بر روی تخمین فرکانس کد و حامل موثر است. بنابراین، با پدیده انتشار خطا روبرو می‌شویم. از این‌رو، در این مقاله از ^۱ STKF تطبیقی استفاده شده است چراکه اولاً STKF حجم محاسبات خیلی بالایی ندارد و از طرفی وابسته به طول پنجره نمی‌باشد. همچنین، STKF در شرایط نامساعد پایداری بهتر و در شرایط مساعد دقت بهتری نسبت به EKF دارد.

سازماندهی مقاله به شرح زیر است: در بخش دوم، مقایسه مختصری بین گیرنده‌های برداری و اسکالر انجام خواهد شد. در بخش سوم، معادلات حلقه‌های ردیابی مرسوم آورده می‌شود. در بخش چهارم، فیلتر کالمن ردیاب قوی معرفی خواهد شد. در بخش پنجم، روش پیشنهادی و در بخش ششم، نتایج شبیه‌سازی‌ها و سرانجام در بخش آخر نتیجه‌گیری آورده می‌شود.

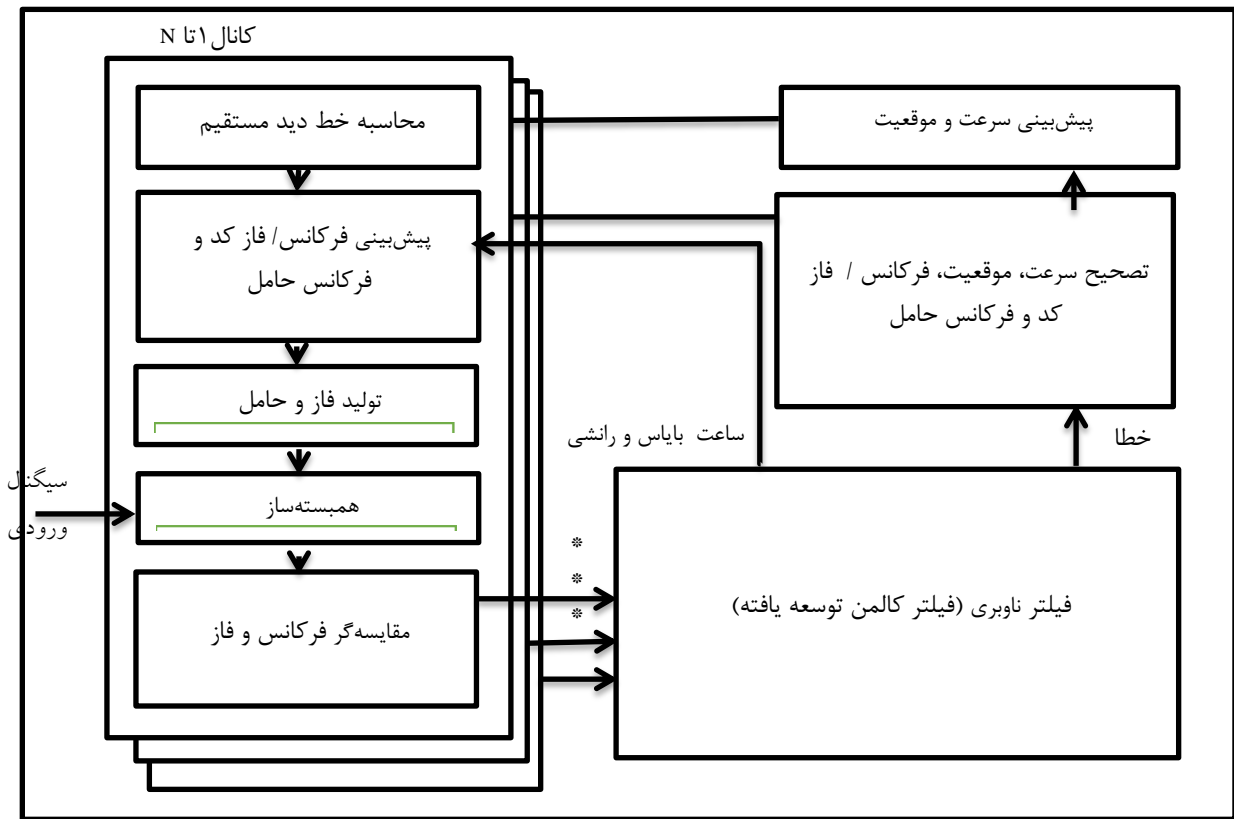
۲- حلقه‌های ردیابی اسکالر و برداری

یک گیرنده GNSS شامل یک قسمت پردازش سیگنال واحد (SPU^۳) و یک قسمت پردازش ناوبری واحد (NPU^۴) است که هرکدام توابع مستقلی برای خود دارند. SPU کار ردیابی سیگنال



شکل (۲): ساختار کلی حلقه ردیابی اسکالر

- 1- Strong Tracking Kalman Filter
- 2- SignalProcessing Unit
- 3- Navigation Processing Unit



شکل (۳): ساختار کلی حلقه ردیابی برداری [۹].

$$\hat{f}_{code,j,k+1} = \frac{f_c}{c} [1 + t_{d,k} + (V_{j,k} - V_k)^T a_{j,k+1}] \quad (۳)$$

$$\hat{f}_{carrier,j,k+1} = \frac{f_n}{c} [1 + t_{d,k} + (V_{j,k} - V_k)^T a_{j,k+1}] \quad (۴)$$

φ فاز کد بر حسب m ، ΔX اختلاف موقعیت ماهواره زام بین مرحله k و $k+1$ ، $V_{j,k}$ سرعت ماهواره زام، V_k سرعت کاربر و C سرعت نور را نشان می‌دهد. همچنین f_c و f_n به ترتیب فرکانس کد C/A و فرکانس حامل برای L_1 می‌باشد. بردار $a_{j,k+1}$ یکه واحد دید خط مستقیم بین گیرنده و زامین ماهواره در مرحله $k+1$ می‌باشد و طبق رابطه (۵) تعریف می‌شود [۲۲].

$$a_{j,k+1} = [a_{j,x,k+1} \quad a_{j,y,k+1} \quad a_{j,z,k+1}] \quad (۵)$$

هر کدام از پارامترهای رابطه (۵) طبق رابطه‌های (۶)، (۷) و (۸) بدست می‌آیند که در آنها (x_u, y_u, z_u) موقعیت کاربر و (x_i, y_i, z_i) موقعیت ماهواره را نشان می‌دهد.

۳- معادلات حلقه‌های ردیابی برداری مرسوم

فن پیاده‌سازی VDFLL شبیه به پیاده‌سازی EKF است. برای پیاده‌سازی VDFLL سه مرحله؛ پیش‌بینی، اندازه‌گیری و تخمین در نظر گرفته می‌شود.

۳-۱- پیش‌بینی

وقتی راه‌حل‌های ناوبری در مرحله k مشخص باشد، می‌توان موقعیت و سرعت کاربر را طبق رابطه (۱) در مرحله $k+1$ محاسبه کرد. بنابراین، مقادیر مورد انتظار برای فاز کد، فرکانس کد و فرکانس حامل، به ترتیب از روابط (۲)، (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند [۹]. نشان دهنده فاصله زمانی بین مرحله k و $k+1$ می‌باشد.

$$\hat{X}_{k+1}^+ = \hat{X}_k + t_{k,k+1} \hat{V}_k \quad (۱)$$

$$\hat{V}_{k+1}^+ = \hat{V}_k$$

$$\hat{\varphi}_{j,k+1} = \varphi_{j,k} + (\Delta X_{j,k,k+1} - t_{k,k+1} V_k)^T a_{j,k+1} + t_{k,k+1} c \quad (۲)$$

پیش‌بینی خطای کواریانس طبق رابطه (۱۳) تعریف می‌شود.

$$P_{k+1}^- = FP_k F^T + Q \quad (13)$$

بهره کاملن، تخمین خطای موقعیت و سرعت، تخمین ماتریس خطای کواریانس، به روزرسانی موقعیت و سرعت برای مرحله بعد و در نهایت تخمین سرعت و موقعیت به ترتیب از رابطه‌های (۱ و ۱۷-۱۴) به دست می‌آیند.

$$K_k = P_k H^T (HP_k H^T + R)^{-1} \quad (14)$$

$$\delta X_k^+ = \delta X_k^- + K_k (z - H \delta X_k^-) \quad (15)$$

$$P_k^+ = I - K_k HP_k^- \quad (16)$$

$$\hat{X}_{k+1} = \hat{X}_k + \delta X_k^+ \quad (17)$$

سرانجام تصحیح فاز کد، فرکانس کد و فرکانس حامل به ترتیب از رابطه‌های (۲۰-۱۸) به دست می‌آیند [۹].

$$\varphi_{j,k+1} = \hat{\varphi}_{j,k+1} + \delta X_{k+1}^T a + t_{k,k+1} c + t_{b,k} \quad (18)$$

$$f_{code,j,k+1} = \hat{f}_{code,j,k+1} + (t_{d,k+1} + \delta v_{k+1} a) \frac{f_c}{c} \quad (19)$$

$$f_{carrier,j,k+1} = \hat{f}_{carrier,j,k+1} + (t_{d,k+1} + \delta v_{k+1} a) \frac{f_n}{c} \quad (20)$$

بردار حالت در فیلتر کالمن طبق رابطه (۲۱) تعریف می‌شود که در آن $(\delta x, \delta y, \delta z)$ ، $(\delta v_x, \delta v_y, \delta v_z)$ ، $(\delta t_b, \delta t_d)$ به ترتیب خطای موقعیت، خطای سرعت و خطای بایاس ساعت و رانش آن می‌باشد.

$$\delta X = [\delta x, \delta y, \delta z, \delta v_x, \delta v_y, \delta v_z, \delta t_b, \delta t_d] \quad (21)$$

و F ماتریس انتقال حالت می‌باشد که با توجه به تعریف بردار حالت، مقادیر می‌شود [۹]. ماتریس F مورد استفاده در این مقاله طبق رابطه (۲۲) تعریف می‌شود. Q یکی از پارامترهای بسیار مهم فیلتر کالمن می‌باشد که به آن ماتریس کواریانس نویز سامانه می‌گویند و طبق رابطه (۲۳) تعریف می‌شود [۹]. در واقع عناصر قطری ماتریس Q تغییرات موقعیت، سرعت و زمان را نشان می‌دهد. این مقادیر به طور تقریبی و ثابت در نظر گرفته شده است.

$$a_{j,x,k+1} = \frac{x_u - x_i}{\sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2}} \quad (6)$$

$$a_{j,y,k+1} = \frac{y_u - y_i}{\sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2}} \quad (7)$$

$$a_{j,z,k+1} = \frac{z_u - z_i}{\sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2}} \quad (8)$$

۲-۳. مشاهده و اندازه‌گیری

خروجی همبسته‌سازها، به‌عنوان ورودی تمییزگرهای DLL و FLL در نظر گرفته می‌شوند. مقایسه‌گر DLL ای که در این مقاله از آن استفاده شده است، مطابق رابطه (۹) و همچنین مقایسه‌گر FLL مطابق رابطه (۱۰) می‌باشد.

$$\Delta \tau = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{I_E^2 + Q_E^2} - \sqrt{I_L^2 + Q_L^2}}{\sqrt{I_E^2 + Q_E^2} + \sqrt{I_L^2 + Q_L^2}} \quad (9)$$

$$\Delta f = \frac{cross.sign(dot)}{2\pi t_{k,k+1} (I_{P_1}^2 + Q_{P_1}^2)} \quad (10)$$

$$cross = I_{P_1} I_{P_2} + Q_{P_1} Q_{P_2}$$

$$dot = I_{P_1} Q_{P_2} - I_{P_2} Q_{P_1}$$

و در نهایت بردار مشاهده به‌صورت رابطه (۱۱) در نظر گرفته می‌شود [۲۳].

$$z_k = \begin{bmatrix} \Delta \rho \\ \Delta \rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \tau \cdot c \\ f_c \\ \Delta f \cdot c \\ f_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

۳-۳- تخمین و تصحیح

طبق روابط فیلتر کالمن، ابتدا خطای موقعیت و سرعت تخمین زده می‌شود، سپس به تصحیح سرعت، مکان، فرکانس کد، فاز کد و فرکانس حامل پرداخته می‌شود. روابط (۱۲) تا (۱۷) این روند را نشان می‌دهد. پیش‌بینی خطای موقعیت و سرعت از رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$\delta X_k^- = F \delta X_{k-1} \quad (12)$$

$$R = \frac{1}{N} \sum_{j=k-N+1}^k v_j v_j^T - HP_k^{-1} H^T \quad (26)$$

$$v_k = z - H \delta X_k$$

۴- فیلتر کالمن ردیاب قوی (STKF)

Zhou برای حل مشکل واگرایی فیلتر کالمن در سال ۱۹۹۶، مفهوم فیلتر کالمن ردیاب قوی را مطرح کرد که از آن می‌توان برای حل مسئله تخمین حالت یک دسته از سامانه‌های غیرخطی با نویز سفید بهره گرفت [۲۴]. در STKF، ضرایب محوشدگی کمتر از حد مطلوب به الگوریتم نرم‌کننده غیرخطی اعمال می‌شود. در حالت کلی STKF در مقابل با EKF چهار برتری اساسی دارد که عبارتند از: مقاوم بودن در تغییرات پارامترهای سامانه واقعی، توانایی ردیابی قوی در حالات تغییر ناگهانی [۲۵]، حساسیت کمتر به نویز سامانه، نویز اندازه‌گیری و خصوصیات آماری اولیه و قابلیت ردیابی آنی بسیار خوب حتی زمانی که پرش رخ دهد، بدون توجه به اینکه سامانه به حالت پایدار رسیده باشد [۲۵ و ۲۶]. شرایط کافی برای اینکه یک فیلتر STKF نامیده شود، این است که ماتریس بهره فیلتر، متغیر با زمان به صورت آنی با کمترین خطای میانگین مربعات تخمین زده شود. ضرایب مقیاس‌پذیری زیر حد بهینه، در ماتریس بهره فیلتر متغیر با زمان از رابطه (۲۷) به‌دست می‌آید.

$$\lambda_{i,k} = \begin{cases} \alpha_i c_k & \alpha_i c_k \geq 1 \\ 1 & \alpha_i c_k < 1 \end{cases} \quad (27)$$

که در آن C_k توسط رابطه (۲۸) به‌دست می‌آید که در آن، N_k

و

M_k طبق روابط (۲۹) و (۳۰) تعریف می‌شوند.

$$c_k = \frac{tr(N_k)}{tr(M_k)} \quad (28)$$

$$N_k = \bar{V}_k - \beta R_k - H_k Q H_k^T \quad (29)$$

$$M_k = H_k F P_k Q^T H_k \quad (30)$$

در رابطه (۲۷)، \bar{V}_k توسط رابطه (۳۱) به‌دست می‌آید. که در آن

dv_k طبق رابطه (۳۲) تعریف می‌شود.

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & t_{k,k+1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & t_{k,k+1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{k,k+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & t_{k,k+1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$Q = \text{diag}(\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_{v_x}^2, \sigma_{v_y}^2, \sigma_{v_z}^2, \sigma_{t_x}^2, \sigma_{t_y}^2) \quad (23)$$

یکی دیگر از پارامترهای مهم فیلتر کالمن، ماتریس کواریانس نویز پردازشی می‌باشد که طبق رابطه (۲۴) تعریف می‌شود [۹]. عناصر قطری ماتریس R تغییرات فرکانس کد و حامل را نشان می‌دهد که مقادیر آن به‌صورت تطبیقی در هر مرحله تنظیم می‌شود.

$$R = \text{diag}(\sigma_{code,1}^2, \dots, \sigma_{code,N}^2, \sigma_{carrier,1}^2, \dots, \sigma_{carrier,N}^2) \quad (24)$$

H ماتریس اندازه‌گیری می‌باشد که با توجه به بردار یکه تعریف شده از قبل، طبق رابطه (۲۵) بیان می‌شود. که در آن N تعداد ماهواره‌های در دید می‌باشد. برخی از پارامترها در فیلتر کالمن مثل R ، Q و P بسیار مهم می‌باشند به طوری که اگر آن‌ها را به درستی تنظیم نکنیم، فیلتر کالمن به سرعت واگرا می‌شود و یا در هنگام تغییرات ناگهانی، پایداری خود را از دست می‌دهد. به همین دلیل فیلترهای کالمن تطبیقی مطرح شده‌اند که با توجه به به تعریف پارامترها، آن‌ها را به صورت فقی تنظیم کنند. روش مرسوم تطبیقی کردن فیلتر کالمن در گیرنده‌های برداری به این شکل است که به اندازه یک پنجره، نمونه در نظر گرفته می‌شود و طبق تعریف ماتری R ، آن را به صورت وفقی تنظیم می‌کنند. این روند را طبق رابطه (۲۶) می‌توان در نظر گرفت.

$$H = \begin{pmatrix} a_{1,x,k} & a_{1,y,k} & a_{1,z,k} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N,x,k} & a_{N,y,k} & a_{N,z,k} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{1,x,k} & a_{1,y,k} & a_{1,z,k} & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & a_{N,x,k} & a_{N,y,k} & a_{N,z,k} & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

بر آن پایداری خود را در شرایط خیلی نامناسب، نیز حفظ کند و بتواند در حلقه‌های ردیابی بعد از برگشت سیگنال به حالت طبیعی، دوباره سیگنال را قفل کند. تمام این ویژگی‌ها در STKF وجود دارد. از این رو در این مقاله به جای EKF تطبیقی در ردیابی برداری از STKF تطبیقی استفاده شده است. همان‌طور که اشاره شد، پارامترهای STKF با توجه به دانش طراح تنظیم می‌شود. در این مقاله β برابر با ۲، ρ برابر با ۰٫۹ و α_i برابر با ۱ در نظر گرفته شد. روش پیشنهادی در فرم کلی در شکل (۴) نشان داده شده است.

۶- نتایج شبیه‌سازی‌ها

در این مقاله از داده‌های شبیه‌سازی شده توسط بخش مخابراتی یک گیرنده با فرکانس مرکزی صفر و فرکانس نمونه‌برداری 2.5MHz استفاده شده است. کلیه شبیه‌سازی‌ها در گیرنده‌های نرم‌افزاری با بستر MATLAB پیاده‌سازی شدند. سه سناریوی مختلف در نظر گرفته شده است. سعی شده که سناریوها به گونه‌ای تنظیم شوند که ردیابی برداری سنتی در شرایط به وجود آمده، نتواند سیگنال را قفل کند و یا دچار خطای زیادی شود. در هر ۳ سناریو ابتدا در حالت عادی که سطح سیگنال به نوبت تمام کانال‌ها حدود ۵۰ دسی بل می‌باشد، یکبار گیرنده اسکالر به کار گرفته می‌شود، سپس برخی از کانال‌ها را نویزی کرده و در این شرایط، از گیرنده برداری استفاده می‌شود. در نهایت اختلاف شرایط عادی و نویزی به عنوان خطا، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۶-۱- سناریوی اول

به صورت نرم‌افزاری کانال‌های مربوط به PRN1، PRN20 و PRN24 را آلوده به نویز کرده تا سطح سیگنال به نوبت این کانال‌ها به زیر ۳۰ دسی بل برسد، در این شرایط یکبار گیرنده برداری مرسوم را به کار گرفته و بار دیگر از گیرنده برداری پیشنهادی استفاده شده و در نهایت اختلاف این دو آزمایش که در شرایط نویزی انجام شده، با شرایط عادی به عنوان خطا در نظر گرفته شد. کل مدت زمانی که گیرنده پردازش را انجام می‌دهد، برابر با ۸۰ ثانیه است. از ثانیه ۵۰ تا ۶۵ به مدت ۱۵ ثانیه، سطح سیگنال به نوبت کانال‌های فوق کاهش می‌یابد. از آنجایی که در ردیابی برداری کانال‌ها وابسته به هم می‌باشند، شرایط سیگنال ضعیف مربوط به کانال‌های اشاره شده، روی دیگر کانال‌ها تاثیر می‌گذارد.

$$\bar{V}_k = \begin{cases} dv_0 dv_0^T & k = 0 \\ \frac{[\rho V_{k-1} + dv_k dv_k^T]}{1 + \rho} & k \geq 1 \end{cases} \quad (31)$$

$$dv_k = z_k - \hat{z}_k^- = z_k - H \delta X_k^- \quad (32)$$

و در نهایت، پیش‌بینی ماتریس خطای کواریانس در EKF به صورت رابطه (۳۳) اصلاح می‌شود.

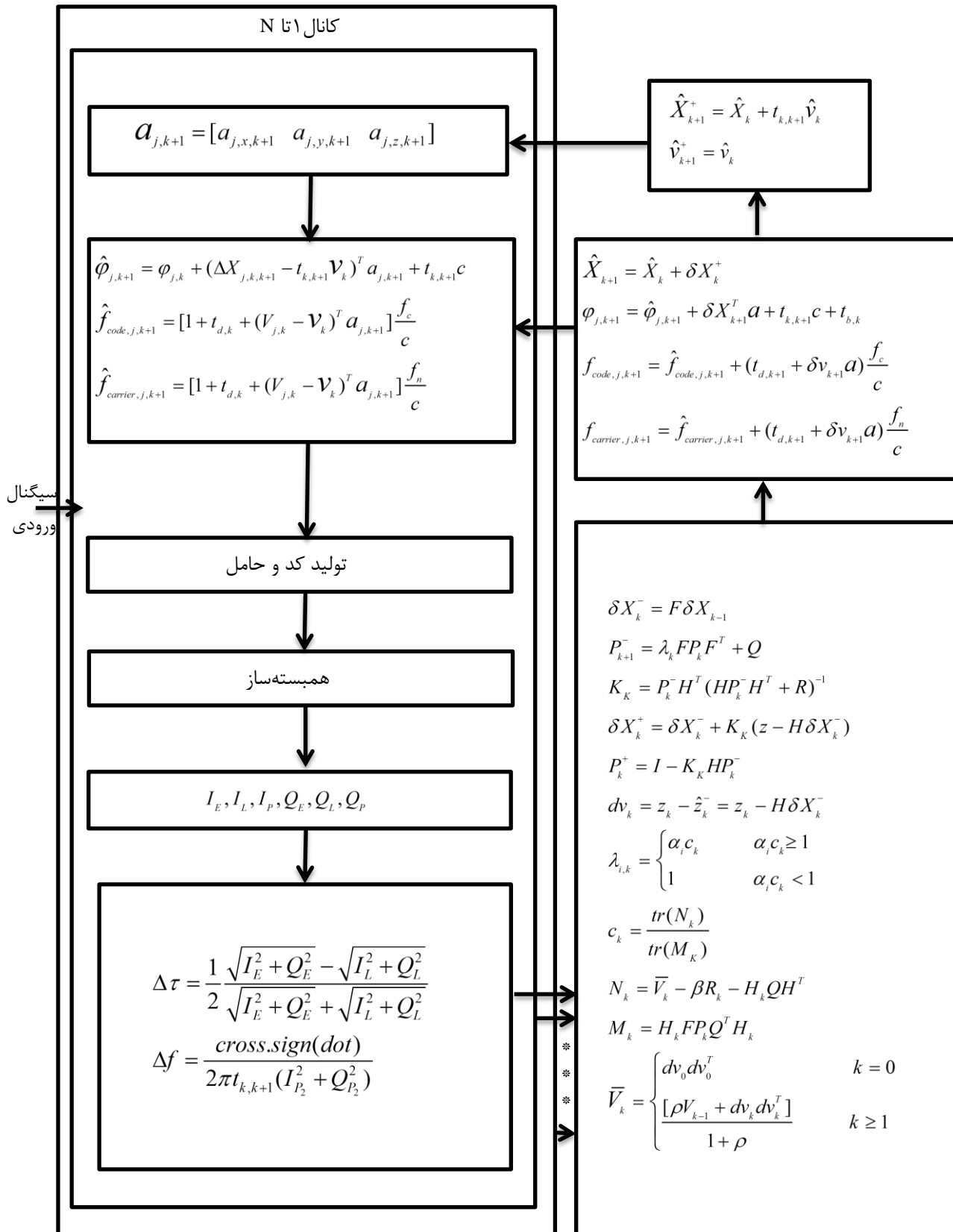
$$P_{k+1}^- = \lambda_k F P_k F^T + Q \quad (33)$$

همان‌طور که مشخص است پارامتر کلیدی در فیلتر کالمن ردیابی قوی λ_k می‌باشد. این پارامتر به ۳ پارامتر دیگر وابسته است که تنظیم آن پارامترها به تجربه و دانش طراح بر می‌گردد. پارامتر α_i برای بهبود قابلیت ردیابی STKF مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً مقدار این پارامتر، برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. پارامتر ρ که از آن به عنوان ضریب فراموش شده یاد می‌شود، معمولاً بین صفر و یک انتخاب می‌شود. β که به آن ضریب محوشدگی می‌گویند، برای بهبود نرمی تخمین حالت مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر بزرگتر β برای تخمین دقیق‌تر به کار گرفته می‌شود و مقادیر کوچک‌تر آن برای افزایش قابلیت ردیابی قوی‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵- به کارگیری STKF در ردیابی برداری

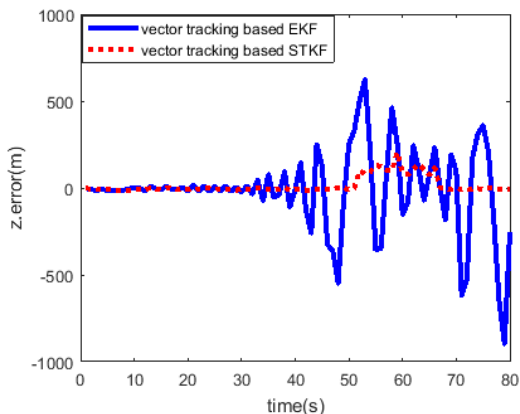
همان‌طور که اشاره شد، در اکثر مقالات سال‌های اخیر در حوزه ردیابی برداری همچنان از EKF به عنوان قلب این روش استفاده می‌شود. این در حالی است که EKF به راحتی واگرا می‌شود. حتی EKF تطبیقی نیز در شرایط نامناسب سیگنال ضعیف پایداری خود را از دست می‌دهد و واگرا می‌شود. از طرفی، در ردیابی برداری به علت استفاده مجدد از موقعیت و سرعت کاربر در تخمین فرکانس کد و حامل، این خطا به صورت رشد می‌کند.

استفاده کردن از دیگر فیلترهای تخمین که حجم محاسبات بالا دارند، در ردیابی برداری مناسب نیست، چرا که ردیابی برداری دارای پیچیدگی محاسباتی بالایی است. بنابراین، اگر از فیلتر کالمن دیگری همچون UKF^۱ در ردیابی برداری استفاده شود، شاید دقت افزایش یابد، اما حجم محاسبات به شدت بالا می‌رود. از این رو باید فیلتری را انتخاب کرد که حجم محاسبات خیلی بالایی نداشته باشد و از طرفی دقت را افزایش دهد و علاوه

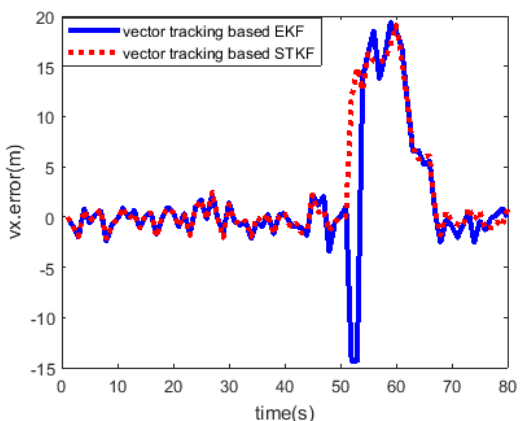


شکل (۴): الگوریتم کلی ردیابی برداری پیشنهادی

شده است. کانال‌های مربوط به PRN1، PRN20، PRN22. تا ۴۰ تا ۵۰، نویزی و زمان کل پردازش برابر با ۱۰۰ ثانیه می‌باشد.



شکل (۷): مقایسه خطای موقعیت Z بین روش ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی در سناریوی اول



شکل (۸): مقایسه خطای سرعت X بین روش ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی در سناریوی اول

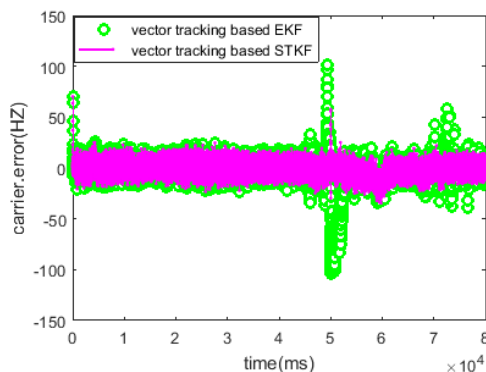
طول پنجره برای هر دو روش در تمام حالات، ۵۰۰ در نظر گرفته شده است. نتیجه خطای فرکانس حامل مربوط به PRN3 و PRN20 به ترتیب در شکل‌های (۱۰-۹) نشان داده شده است.

جدول (۱): مقایسه مقدار RMSE موقعیت و سرعت بین ردیابی برداری مرسوم و پیشنهادی در سناریوی اول

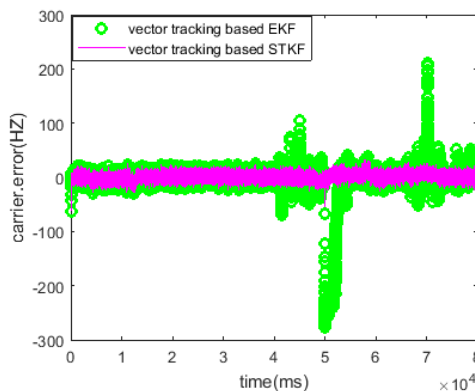
موقعیت و سرعت	EKF	STKF
X(m)	۳۵۶,۰۵	۲۸,۳۰
Y(m)	۹۶,۱۱	۲۵,۶۸
Z(m)	۲۴۲,۵۵	۴۹,۶۵
Vx(m/s)	۶,۱۷	۵,۸۹
Vy(m/s)	۷,۳۷	۶,۳۰
Vz(m/s)	۹,۵۷	۹,۰۵

همانطور که مشخص است، در بازه زمانی که سیگنال ضعیف است و حتی بعد از آن، ردیابی برداری مبتنی بر EKF مقدار خطای بسیار زیادی دارد چراکه پایداری خود را تا حدودی از

شکل‌های (۶-۵) به ترتیب خطای فرکانس حامل کانال آلوده به نویز PRN1 و کانال غیرآلوده به نویز PRN22 را در حالت ردیابی برداری مبتنی بر EKF و ردیابی برداری مبتنی بر STKF زمانی که طول پنجره برابر با ۵۰۰ می‌باشد، را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است روش EKF بعد از ضعیف شدن سیگنال دچار خطای زیاد شده، اما روش STKF همچنان به ردیابی خود با پایداری مناسب ادامه می‌دهد. خطای موقعیت و سرعت گیرنده در دو حالت ردیابی برداری مبتنی بر EKF و ردیابی برداری مبتنی بر STKF زمانی که در هر دو حالت طول پنجره ۵۰۰ می‌باشد، در شکل‌های (۸-۷) مشخص شده است. همان‌طور که مشخص است، از ثانیه ۵۰ تا ۶۵، روش EKF به سرعت واگرا شده اما روش STKF همچنان با پایداری مناسب به ردیابی و موقعیت‌یابی خود ادامه می‌دهد. جدول (۱) خطای RMSE مربوط به موقعیت و سرعت گیرنده در حالتی که طول پنجره ۵۰۰ می‌باشد، برای ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی را مورد قیاس قرار می‌دهد. همان‌طور که مشخص است مقدار خطای RMSE ردیابی برداری پیشنهادی نسبت به ردیابی برداری مرسوم، کمتر است.



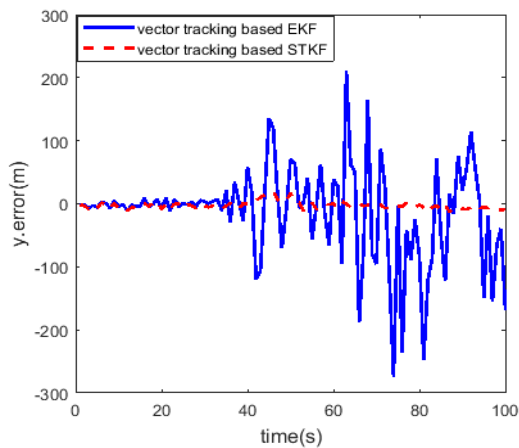
شکل (۵): مقایسه خطای فرکانس حامل مربوط به PRN1 بین ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی در سناریوی اول



شکل (۶): مقایسه خطای فرکانس حامل مربوط به PRN22 بین ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی در سناریوی اول

۲-۶- سناریوی دوم

در این سناریو شرایط سیگنال ضعیف متفاوت در نظر گرفته



شکل (۱۱): مقایسه خطای موقعیت Y بین روش ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی در سناریوی دوم

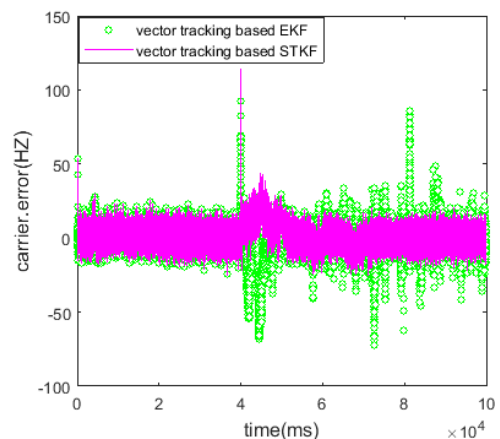
۳-۶- سناریوی سوم

در این سناریو شرایط سیگنال نسبت به دو سناریوی قبلی بدتر شده است. به گونه‌ای که SNR تمام ۸ ماهواره تضعیف شد و تمام کانال‌ها آلوده به نویز شدند. مدت زمان کل پردازش برابر با ۹۰ ثانیه در نظر گرفته شد که تضعیف تمام کانال‌ها در بازه زمانی ۴۰ تا ۹۰ ثانیه اعمال شد. به عنوان نمونه شکل (۱۳) خطای فرکانس حامل مربوط به PRN3 را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است از ثانیه ۳۰ که تضعیف کانال‌ها شروع شده، ردیابی برداری مبتنی بر EKF واگرا شده و در ثانیه ۴۰ که دوباره SNR سیگنال به مقدار مطلوب رسیده، روش سنتی ردیابی برداری، نتوانسته سیگنال را قفل کند و حلقه ردیابی باز شده است. در حالی که ردیابی برداری مبتنی بر STKF اگرچه نتوانسته در ثانیه ۴۰ حلقه را قفل کند، اما بالاخره در ثانیه ۷۰ دوباره سیگنال را قفل کرده و ردیابی را با خطای تقریباً صفر ادامه می‌دهد.

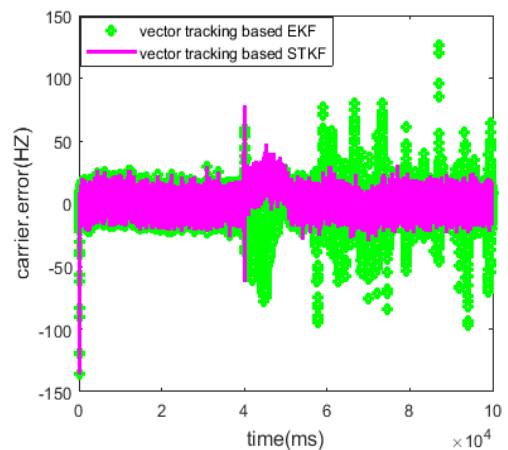
جدول (۲): مقایسه مقدار RMSE موقعیت و سرعت بین ردیابی برداری مرسوم و پیشنهادی در سناریوی دوم

موقعیت و سرعت	EKF N=500	STKF N=500	EKF N=100	STKF N=100
X(m)	۴۴۱/۲۲	۷/۴۴	۱۲/۴۰	۷/۳۶
Y(m)	۷۸/۹۲	۶/۲۸	۶/۷۷	۶/۴۸
Z(m)	۲۶۱/۱۶	۹/۹۰	۱۱/۶۹	۸/۷۴
Vx(m/s)	۱/۵۲	۱/۱۸	۱/۷۱	۱/۱۶
Vy(m/s)	۱/۱۷	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۴
Vz(m/s)	۲/۰۰	۱/۶۸	۱/۷	۱/۷

دست داده است، اما STKF به خوبی توانسته در مقابل این شرایط پایداری خود را حفظ کند. شکل (۱۱) و (۱۲) به ترتیب خطای موقعیت Y و سرعت Y را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل‌ها مشخص است، در بازه زمانی که سیگنال ضعیف می‌شود و همچنین بعد از آن، ردیابی برداری مرسوم، مقدار خطای بسیار زیادی دارد. ولی ردیابی برداری مبتنی بر STKF نه تنها بعد از مدت زمانی که سیگنال ضعیف شده بود، به حالت اول برمی‌گردد، بلکه در زمان ضعیف بودن سیگنال مقدار خطای بسیار کمی نسبت به روش مرسوم دارد. در این سناریو هر دو الگوریتم یکبار با طول پنجره ۵۰۰ و بار دیگر با طول پنجره ۱۰۰، مورد آزمایش قرار گرفت. جدول (۲) به ترتیب مقدار RMSE موقعیت و سرعت را بین دو روش ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری مبتنی بر STKF، وقتی طول پنجره ۵۰۰ و ۱۰۰ می‌باشد، را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است EKF در حالتی که طول پنجره ۱۰۰ می‌باشد، رفتاری ایده‌آل و تقریباً نزدیک به STKF دارد. اما STKF برای هر دو حالت رفتاری مشابه دارد که این نشان از عدم حساسیت STKF و وابستگی EKF به طول پنجره می‌باشد.



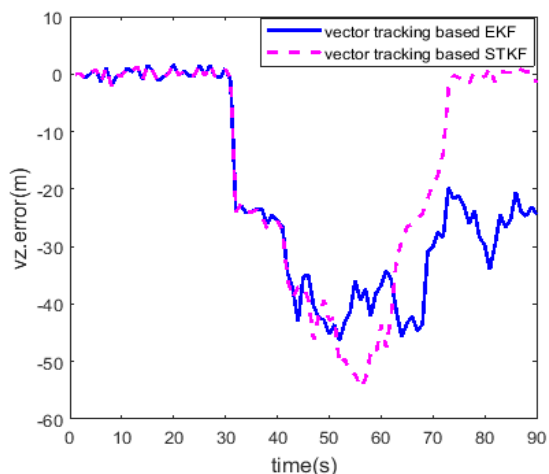
شکل (۹): مقایسه خطای فرکانس حامل مربوط به PRN3 بین ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی در سناریوی دوم



شکل (۱۰): مقایسه خطای فرکانس حامل مربوط به PRN20 بین ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی در سناریوی دوم

۷- نتیجه‌گیری

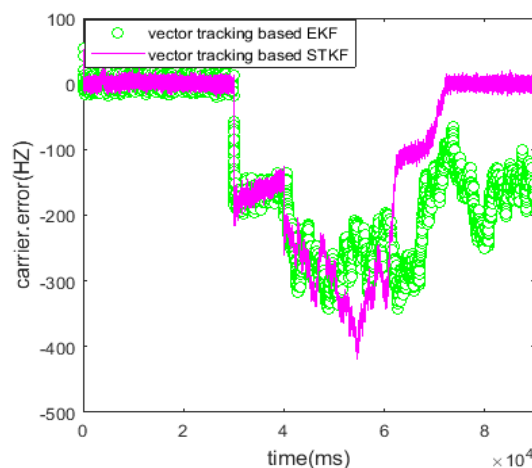
در این مقاله برای حل مشکل واگرایی، ناپایداری و حساسیت بسیار بالای EKF تطبیقی به پارامترهایی همچون P, Q, R و طول پنجره در شرایط سیگنال ضعیف، الگوریتم ردیابی برداری مبتنی بر STKF تطبیقی پیشنهاد شد.



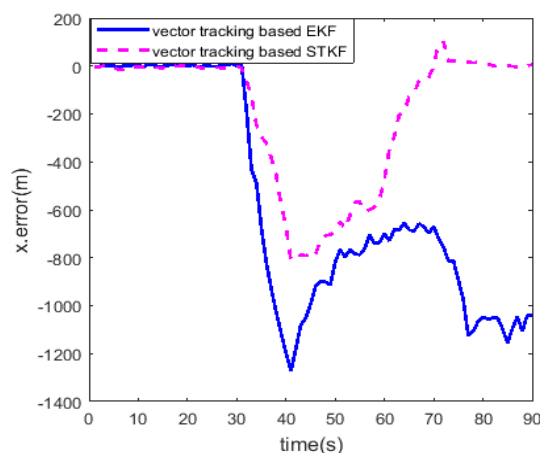
شکل (۱۵): مقایسه خطای سرعت Z بین روش ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی در سناریوی سوم

همان‌طوری که نتایج شبیه‌سازی‌ها در سه سناریوی مختلف (که به ترتیب در هر کدام از سناریوها شرایط سیگنال بدتر شده بود)، نشان داده است، ردیابی برداری پیشنهادی نسبت به ردیابی برداری مرسوم، پایداری و دقت بسیار بالاتری داشته و به خوبی توانسته بعد از انتهای بازه‌های زمانی که سیگنال ضعیف می‌شود به شرایط عادی برگردد و به ردیابی با خطای کم ادامه دهد. اگر شرایط سیگنال نامناسب باشد، حلقه‌های ردیابی سنتی قادر به قفل سیگنال نیستند، در حالی که روش برداری به خوبی می‌تواند سیگنال را قفل کند. اما اگر شرایط سیگنال همانند سناریوهای انتخابی در این مقاله، خیلی نامناسب باشد، حتی حلقه‌های برداری سنتی هم نمی‌توانند سیگنال را قفل کنند، چرا که EKF تطبیقی استفاده شده در ردیابی برداری، پایداری لازم را ندارد. از این رو، در این شرایط بسیار نامناسب همان‌طور که شبیه‌سازی‌ها نشان داده است، بهتر است از ردیابی برداری پیشنهادی که از STKF به جای EKF بهره می‌برد، استفاده شود. از آنجایی که پیچیدگی محاسباتی ردیابی برداری پیشنهادی، در صورت تنظیم دقیق پارامترها، بیشتر از الگوریتم برداری مرسوم نمی‌باشد، بنابراین با توجه به دقت و پایداری بهتر STKF، می‌توان به این نتیجه رسید که در حالت کلی در گیرنده‌های برداری بهتر است از

شکل‌های (۱۴-۱۵) به ترتیب خطای مربوط به موقعیت در راستای X و خطای سرعت در راستای Z را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، ردیابی برداری سنتی نتوانسته بعد از تضعیف سیگنال در بازه ۳۰ تا ۴۰ ثانیه، دوباره سیگنال را قفل کند و خطای موقعیت و سرعت حتی بعد از عادی شدن شرایط سیگنال مقدار بسیار زیادی دارد. این در حالی است که ردیابی برداری پیشنهادی اگرچه نتوانسته در ثانیه ۴۰ که شرایط تمام کانال‌ها عادی شده است، خطای موقعیت و سرعت را کاهش دهد، اما بالاخره در ثانیه ۷۰ توانسته خطای موقعیت و سرعت را دوباره به مقدار خیلی کمی برساند. در واقع این سناریو نشان داده است که ردیابی برداری پیشنهادی دارای پایداری بیشتری نسبت به ردیابی برداری سنتی می‌باشد.



شکل (۱۴): مقایسه خطای فرکانس حامل مربوط به PRN3 بین ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی در سناریوی سوم



شکل (۱۶): مقایسه خطای موقعیت X بین روش ردیابی برداری مرسوم و ردیابی برداری پیشنهادی در سناریوی سوم

- [13] Y. Ng and G. X. Gao, "Advanced Multi-Receiver Vector Tracking for Positioning a Land Vehicle," Proceedings of the 28th International Meeting of the ION Satellite, 2015.
- [14] Y. Song and B. Lian, "Combined BDS and GPS Adaptive Vector Tracking Loop in Challenge Environment," International Conference on China Satellite Navigation, pp. 557-570, 2016.
- [15] M. Cuntz, A. Konovaltsev, and M. Meurer, "Concepts, Development, and Validation of Multiantenna GNSS Receivers for Resilient Navigation," IEEE Magazines on Proceedings, vol. 104, no. 6, pp. 1288-1301, 2016.
- [16] Zh. Su, X. Wang, Sh. Feng, H. Che, and J. Zhang, "Design of an Adaptive GPS Vector Tracking Loop With the Detection and Isolation of Contaminated Channels," GPS Solutions, vol. 21, no. 2, pp. 701-713, 2016.
- [17] F. Li, R. Wu, and W. Wang, "The Anti-jamming Performance Analysis for Vector Tracking Loop," International Conference on China Satellite Navigation, pp. 665-675, 2016.
- [18] A. Tabatabaei, M. R. Mosavi, H. S. Shahhoseini, and K. Borre, "Vectorized and Federated Software Receivers Combining GLONASS and GPS," GPS Solutions, vol. 21, no. 3, pp. 1331-1339, 2017.
- [19] G. Liu, R. Zhang, M. Guo, and X. Cui, "Accuracy Comparison of GNSS Vector and Scalar Tracking Loop," IEEE Conference on Navigation and Control, pp. 1346-1351, 2014.
- [20] M. Lashley and D. M. Bevly, "Analysis of Discriminator Based Vector Tracking Algorithms," Proceedings of the Institute of Navigation (ION), San Diego, pp. 570-576, 2007.
- [21] D. W. Lim, H. W. Kang, S. L. Cho, S. J. Lee, and M. B. Heo, "Performance Evaluation of a GPS Receiver with VDFLL in Harsh Environments," International Global Navigation Satellite Systems Society IGSS Symposium, 2013.
- [22] D. J. Jwo, Z. M. Wen, and Y. C. Lee, "Vector Tracking Loop Assisted by the Neural Network for GPS Signal Blockage," Applied Mathematical Modeling, vol. 39, no. 19, pp. 5949-5968, 2015.
- [23] Y. Song and B. Lian, "Combined BDS and GPS Adaptive Vector Tracking Loop in Challenge Environment," International Conference on China Satellite Navigation, pp. 557-570, 2016.
- [24] D. H. Zhou and P. M. Frank, "Strong Tracking Kalman Filtering of Nonlinear Time-Varying Stochastic Systems with Colored Noise: Application to Parameter Estimation and Empirical Robustness Analysis," International Journal Control, vol. 65, no. 2, pp. 295-307, 1996.
- [25] D. J. Jwo and S. H. Wang, "Adaptive Fuzzy Strong Tracking Extended Kalman Filtering for GPS Navigation," IEEE Sensors Journal, vol. 7, no. 3, pp. 778-789, 2007.
- [26] X. Chen, C. Shen, W-b Zhang, M. Tomizuka, Y. Xu, and K. Chiu, "Novel Hybrid of Strong Tracking Kalman Filter and Wavelet Neural Network for GPS/INS during GPS Outages," Measurement Journal, vol. 46, no. 10, pp. 3847-3854, 2013.

فیلتر کالمن ردیاب قوی استفاده کرد. بنابراین، با استفاده از STKF به جای EKF در ردیابی برداری، یک برتری عمده به ردیابی برداری سنتی اضافه شده است. مزایای این برتری عبارتند از: افزایش دقت، پایداری و مقاومت گیرنده‌های برداری بدون حجم محاسبات بالاتر نسبت به حالت مرسوم.

۸- منابع

- [1] M. R. Mosavi, M. Moazedi, M. J. Rezaei, and A. Tabatabaei, "Interference Mitigation in GPS Receivers," Iran University of Science & Technology, 2015. (in persian)
- [2] E. Shafiee, M. R. Mosavi, and M. Moazedi, "Detection of Spoofing Attack Based on Multi-Layer Neural Network in Single-Frequency GPS Receivers," Journal of Electrical & Cyber Defence, vol. 3, no. 1, 2015. (in persian)
- [3] B. Parkinson, J. Spilker, P. Axelrad, and P. Enge, "Global Positioning System: Theory and Applications," American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC, 1996.
- [4] T. Pany, R. Kaniuth, and B. Eissfeller, "Deep Integration of Navigation Solution and Signal Processing," Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS), pp. 1095-1102, 2005.
- [5] T. Pany, R. Kaniuth, and B. Eissfeller, "Testing a Vector Delay/Frequency Lock Loop Implementation with the Ipx Software Receiver," In Proceedings of GPS/GNSS Symposium, 2005.
- [6] T. Pany and B. Eissfeller, "Use of a Vector Delay Lock Loop Receiver for GNSS Signal Power Analysis in Bad Signal Conditions," In IEEE/ION PLANS, pp. 893-903, 2006.
- [7] J. H. Won and B. Eissfeller, "Effectiveness Analysis of Vector-Tracking-Loop in Signal Fading Environment," In Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, pp. 1-6, 2010.
- [8] M. Lashley, D. M. Bevly, and J. Y. Hung, "A Valid Comparison of Vector and Scalar Tracking Loops," In IEEE/Ion Plans, pp. 464-474, 2010.
- [9] S. Zhao and D. M. Akos, "An Open Source GPS/GNSS Vector Tracking Loop-Implementation, Filter Tuning, and Results," In Ion Itm, pp. 1293-1305, 2011.
- [10] J. Liu, X. W. Cui, and M. Q. Lu, "A Vector Tracking Loop based on ML Estimation in Dynamic Weak Signal Environments," in Proc. CSNC, Guangzhou, China, pp. 629-643, 2012.
- [11] L. T. Hsu, P. D. Groves, and Sh. Sh. Jan, "Assessment of the Multipath Mitigation Effect of Vector Tracking in an Urban Environment," Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting, 2013.
- [12] S. Zhao, S. Hrbek, M. Lu, and D. Akos, "Deep Integration of GPS/INS Based on a Software Defined Receiver- Implementation and Test Results," Proceedings of the 27th International Meeting of the ION Satellite, 2014.

Enhancing Vector Tracking Accuracy of GPS in Weak Signal Condition Based on Adaptive Strong Tracking Kalman Filter

M. Anarfarhad, M. R. Mosavi*, A. A. Abedi

*Iran University of Science and Technology

(Received: 13/03/2016, Accepted: 22/10/2016)

ABSTRACT

In this paper, a new method for vector tracking of GPS satellite signals in weak signal circumstances is presented. Extended Kalman Filter (EKF) is usually used in vector tracking. As divergence is one of the main problems in common Kalman filters, Adaptive Kalman filters are used to avoid divergence. Common adaptive Kalman filter in vector tracking is implemented using a window with limited length, which cannot be greater than a specified amount and so after a short while Kalman filter will become divergent again. Window length is specified empirically and in accordance to statistical characteristics which may lead to an ideal solution for one specific amount, but not the other. Therefore adaptive Strong Tracking Kalman Filter (STKF) is used in this paper. Simulation results show that adaptive STKF has high accuracy in relation to adaptive EKF, and in case of correctly arranged STKF parameters computing complexity of the proposed vector tracking will be less than the traditional method. Results show that in comparison to traditional vector tracking, methods based on adaptive STKF have significantly reduced errors in measuring carrier frequency, position and of course velocity.

Keywords: GPS, Vector Tracking, Strong Tracking Kalman Filter, Weak Signal