Archive of SID

روش‌های تولید تصحیح و بهبود دقت در سیستم تعیین موقعیت آنی DGPS

داوود نجات دانش‌آموخته کارشناسی ارشد ژئودزی دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

بهزاد وثوقی دانشیار گروه ژئودزی دانشکده مهنـدسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

برای کاربران غیرنظامی سیستم GPS تعیین موقعیت آنی تنها از طریق مشاهدات کد C/A امکان‌پذیر است. بالا بردن سطح دقت و صحت مشاهدات GPS بصورت آنی و بهبود پارامترها و پیام‌های ناوبری، تعیین موقعیت دقیق‌تر آنی را در پی خواهد داشت. روش‌های تولید تصحیح و بهبود دقت که قابلیت بکارگیری آنی آنها وجود دارد، در این راستا مطرح شده‌اند که می‌توان تحت عنوان روش‌های DGPS از آنها یاد کرد. این مقاله به بررسی کلی این روش‌ها اختصاص دارد. نتایج عددی حاصل از بکارگیری این روش‌ها در مشاهدات مربوط به ۵ ایستگاه دائمی GPS در شبکه البرز نیز در آن گنجانده شده است. نتایج بدست آمده چنانچه انتظار می‌رفت حکایت از بهبود چشمگیر دقت مشاهدات GPS پس از اعمال تصحیحات DGPS دارد. بطوری که رقم جذر میانگین مربعات خطای مشاهدات از ۶۱ متر به ۱/۵ متر بهبود پیدا کرده است. بهبود دقت مشاهدات با اعمال پارامترهای حاصل از روش‌های DGPS چند مرجعی، نسبت به حالت تک مرجعی، نمود بارزتری دارد. در حوزه مشاهدات کد، مدل انترپولاسیون خطی در حوزه فاصله افقی و ارتفاع (LIMhd)، و مدل ترکیب خطی در سه بعد (LCMxyh)، بیشترین بهبود دقت (تا ۴۷درصد) را نسبت به حالت تک مرجعی نشان می‌دهد و در حوزه مشاهدات فاز، برازش رویه دوخطی (BILS) بیشترین بهبود دقت (تا ۴۰ درصد) را در پی دارد.

کلمات کلیدی: تصحیحات دیفرانسیلی، مشاهدات کد، مشاهدات فاز، الگوریتم دیفرانسیلی.

Methods of Accuracy Improvement and Correction Generation in Real-Time DGPS Positioning

D. Nejat and B. Voosoghi
Faculty of Geodesy & Geomatics Eng., K.N. Toosi University of Technology

Abstract

SPS (standard positioning services) users of GPS can determine the position with C/A code observations in real-time. In order to improve the real-time positioning accuracy and standard navigation requirements some methods has been developed to increase the accuracy level of GPS observations in real-time. This concept contains DGPS correction generation methods. In this paper we discuss some DGPS methods and simulate some of them by using the GPS observations of five permanent GPS stations in Alborz network. According to the results Potential of errors decreases from $_{61}$m down to $_{1.5}$m. Applying the network-derived parameters result in better accuracy level. In code observation domain, LIMdh method and LCMxyh method show the most efficiency and the best accuracy improvement (up to 47%), while in carrier phase observation domain bilinear surface fitting results the best accuracy improvement (up to 40%).

Key words: Differential correction, Code observation, Carrier phase observation, Differential algorithm.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

تعیین موقعیت آنی، بدست آوردن موقعیت با مشاهدات جمع‌آوری شده، بدون عملیات پس‌پردازش[1] و در همان زمان واقعی[2] می‌باشد. اگر از مشاهدات تنها یک اپوک برای بدست آوردن موقعیت در همان اپوک استفاده شود، تعیین موقعیت، لحظه‌ای[3] خواهد بود [۱]. تعیین موقعیت آنی در GPS تنها از طریق مشاهدات کد امکان‌پذیر است که دقت حاصل برای کاربران SPS [4] ، در سطح اطمینان ۹۵ درصد و در افق، بهتر از ۱۳ متر و برای مؤلفه ارتفاعی بهتر از ۲۲ متر می‌باشد [۲].

کاربران سیستم تعیین موقعیت آنی DGPS ، تصحیحات دریافتی از این سیستم را به مشاهدات معمول GPS ، اعمال کرده و دقت آنی بهتری بدست می‌آورند. این تصحیحات باید بتوانند خطاهای موجود را حذف کنند یا کاهش دهند. این سیستم در حالت کلی متشکل از ایستگاه‌هایی است که دارای موقعیت دقیق یک یا بیش از یک نقطه هستند. این ایستگاه‌ها با دریافت اطلاعات سیستم GPS و با داشتن موقعیت دقیق این نقاط، تصحیحاتی همراه با پیام‌های هشداری برای کاربران سیستم در منطقه تحت پوشش، جهت بهبود دقت و صحت سیستم GPS ارسال می‌کنند.

دو گروه عمده این روش‌ها عبارتند از: الف) روش‌های تولید بردار تصحیح و ب) روش‌های تولید تصحیح اسکالر. مؤلفه‌های بردار تصحیح شامل تصحیحاتی برای تأثیر منابع مختلف خطاست، در حالی‌که مقدار اسکالر تصحیح، برای رفع تأثیر منابع مختلف خطا بدون تفکیک آن‌ها و در فضای مشاهدات اعمال می‌شود. روش‌های گروه الف، روش‌های فضای وضعیت[5] ، و روش‌های گروه ب، روش‌های فضای مشاهدات[6] نامیده می‌شوند [۲]. ایستگاه‌های مرجع DGPS که موقعیت دقیق آنها معلوم است، برای تولید تصحیحات می‌توانند مستقل از هم عمل کنند و در این صورت سیستم تک مرجعی DGPS را تشکیل می‌دهند. در صورتی که ایستگاه‌های مرجع دارای ارتباط داخلی باشند و مشاهدات آنها به اتفاق هم برای تولید تصحیحات (برداری یا اسکالر) بکار روند، تشکیل سیستم تعیین موقعیت چند مرجعی (شبکه‌ای) DGPS را می‌دهند.

در این زمینه و در سال ۲۰۰۳ آقای سیبر به بررسی جامعی از روش‌های DGPS چند مرجعی و تک مرجعی ارائه شده پرداخته است و به متدهای مطرح برای بکارگیری عملی این الگوریتم‌ها نیز اشاره کرده است [۲]. ایشان در زمینه تعیین موقعیت دقیق آنی با ایستگاه‌های DGPS نیز در سال ۲۰۰۰ به بررسی متدهای ارائه شده پرداخته است [۳].

۲- خلاصه‌ای از منابع خطا و میزان تأثیر آنها در مشاهدات GPS

خطاها در سیستم GPS فراخور معیارهای مختلف دسته‌بندی‌های مختلفی خواهد داشت که با توجه به اینکه در این مقاله سعی در بررسی نحوه حذف خطاها به طور آنی، داریم ، این دسته‌بندی را در نظر می‌گیریم.

گروه اول: خطاهای وابسته به فاصله (یونسفری، تروپسفری، مداری)

گروه دوم: خطاهای وابسته به زمان (خطاهای مربوط به ساعت گیرنده و ماهواره)

گروه سوم: خطاهای غیر وابسته (چند مسیری، نویز، تغییرات مرکز فاز آنتن) [۲]

پخش سیگنال‌های GPS از آنتن ماهواره تا آنتن گیرنده، تأثیرات یونسفری، تأثیرات تروپسفری و تأثیرات چند مسیری را در پی خواهد داشت.

میزان خطای یونسفری نیز از ۲ تا ۱۵۰ متر متغیر می‌باشد. شایان یادآوری است که مقادیر ذکر شده در فضای مشاهدات شبه فاصله غیر تفاضل‌ی است [۲، ۳].

برای برخورد با تأثیر یونسفر می‌توان از گیرنده‌های دو فرکانسه استفاده کرد و مقدار آن را از طریق ۲ فرکانس دریافتی بدست آورد که دقت این روش در برآورد یونسفر در حد سانتیمتر است. روش‌های دیگری برای مدل کردن یونسفر وجود دارد که در بهترین حالت، دقت ۱ تا ۲ متر می‌باشد و در بدترین حالت، دقت از ۱۰ تا ۵۰ متر متغیر خواهد بود [۲].

میزان خطای تروپسفری در سمت‌الراس حداکثر تا ۲/۳ متر می‌رسد و در حالتی که ماهواره به افق محل نزدیک باشد، حداکثر تا ۲۵ متر خواهد رسید. بهترین دقت با استفاده از

[1] Post-processing
[2] Real-time positioning
[3] Instantaneous positioning
[4] Standard Positioning service
[5] State space method
[6] Measurement domain methods

www.SID.ir

Archive of SID

مدل‌های موجود، که بر اساس پارامترهای جوی است، درحد دسی‌متر است [۲، ۳].

اثر چند مسیری بر روی مشاهدات کد C/A تا ۳۰۰ متر و در مشاهدات کد P تا ۳۰ متر می‌تواند برسد. اثر چند مسیری برای مشاهدات فاز موج حامل نیز حداکثر تا ۲۵ درصد طول موج حامل، می‌باشد. برخورد با این خطا در تعیین موقعیت آنی حائز اهمیت است [۲].

از جمله منابع دیگر خطا تجهیزات بخش‌های مختلف سیستم است . در مورد گیرنده GPS خطای ساعت از ۱۰ تا ۱۰۰ها متر متغیر خواهد بود. شاهد نویز در مشاهدات سیستم نیز هستیم که به صورت سرانگشتی تقریباً ۱ درصد ازطول موج سیگنال می‌باشد و با این حساب برای مشاهدات کد C/A، ۳ متر، مشاهدات کد P، ۳۰ سانتیمتر و مشاهدات فاز موج حامل در حد ۲ میلیمتر خواهد بود. خطای تغییرات مرکز فاز آنتن نیز در حد، چند میلیمتر تا چند سانتیمتر خواهد بود. خطای ساعت ماهواره در صورت رفع نشدن ، تا ۳۰۰ هزار متر می‌رسد که با اعمال پارامترهای تصحیح موجود در فایل ناوبری، مقدار آن ۱ تا ۱۰ متر خواهد بود [۱ ،۲ و ۳].

منبع دیگر خطا، قوانین مکانیک نیوتنی است که مطابق حقیقت هستی نیست و باید تأثیرات مدل کامل‌تر نسبیت درنظر گرفته شود.

تأثیر بکارگیری مدل نسبیت در مدار ماهواره بسیار ناچیز است و از آن صرف نظر می‌شود. با توجه به نظریه نسبیت، میدان جاذبی موجب انحنای سیگنال GPS از مسیر ایده‌ال مستقیم می‌شود که بر اثر انحنای فضا - زمان در میدان جاذبی است و مقدار ماکزیمم آن ۱۸/۷ میلیمتر می‌باشد که در فضای مشاهدات شبه فاصله می‌باشد. این خطا در مشاهدات تفاضلی تقریباً حذف می‌شود و قابل صرف‌نظر کردن است. تأثیر نسبیت در ساعت ماهواره نیز در مشاهدات تفاضلی حذف می‌شود و اثرات آن در ساعت گیرنده در نرم‌افزار خود گیرنده تصحیح می‌شود [۱].

۳- سیستم تعیین موقعیت آنی DGPS تک مرجعی

اگر تصحیحات سیستم تعیین موقعیت آنی بر اساس داده‌های یک ایستگاه مرجع تولید شود، در آن صورت سیستم تک مرجعی خوانده می‌شود. ممکن است تعداد زیادی ایستگاه موجود باشد ولی ایستگاه‌ها مستقل از هم عمل کنند، در این صورت باز سیستم تک مرجعی است. به عبارت دیگر واژه تک مرجعی در بر دارنده مفهوم وجود تنها یک ایستگاه نیست، بلکه منظور این است که برای تولید اطلاعات سیستم، داده‌های ایستگاه‌ها جدا از هم در نظر گرفته می‌شود و بکار می‌رود.

در مقابل این مفهوم، مبحث سیستم تعیین موقعیت آنی چند ایستگاهی موجود است که داده‌های چند ایستگاه جمع‌آوری می‌شود و در کنار هم پردازش شده، منطقه مورد نظر را تحت پوشش اطلاعات سیستم قرار می‌دهند.

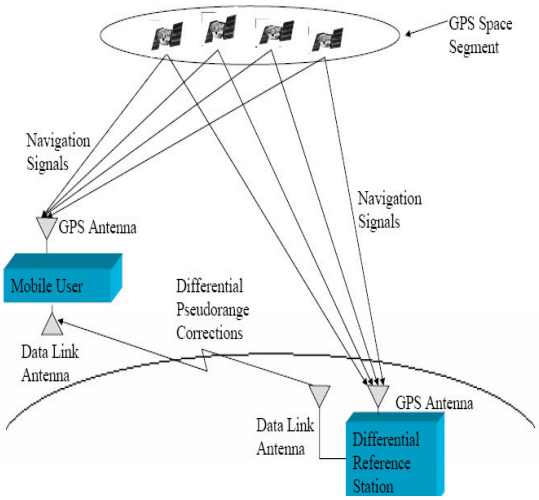
سه کلاس مختلف برای این نوع سیستم با توجه به معیار دقت وجود داردکه عبارتند از:

الف) DGPS متداول[۷]

ب) DGPS با کدهای نرم شده با فاز[۸]

ج) DGPS دقیق[۹] [۱، ۲]

در طی این بخش ضمن ارائه توضیحاتی در ارتباط با سیستم DGPS تک مرجعی، مشکلات و محدودیت‌های آن نیز بیان خواهد شد.



شکل ۱- سیستم تعیین موقعیت DGPS تک مرجعی [۴]

۳-۱- محاسبه تصحیحات در سیستم DGPS تک مرجعی

تصحیحات مربوط به شبه فاصله کد و نرخ آنها برای هر ماهواره و در یک اپوک ارسال می‌شود. نحوه محاسبه تصحیحات بدین صورت است:

[7] Ordinary DGPS
[8] Carrier-smoothed DGPS
[9] Precise DGPS

www.SID.ir

Archive of SID

معادله مشاهده شبه فاصله کد را به صورت زیر در نظر می‌گیریم [۵]:

$$PR_r^j(t_0) = \rho_r^j + Tr_r^j + I_r^j + O_r^j + c.(\Delta T^j - \Delta t_r) + M_r^j + e_{PR} \quad (۱)$$

این معادله مشاهده در اپوک t_0 برای ایستگاه مرجع r و ماهواره j می‌باشد. PR نمایانگر مشاهده شبه فاصله کد می‌باشد.

فاصله هندسی ماهواره تا ایستگاه مرجع با توجه به مختصات معلوم ایستگاه مرجع و مختصات ارسالی ماهواره محاسبه می‌شود. بنابر این خطای مشاهده شبه فاصله در ایستگاه مرجع یا تصحیح دیفرانسیلی مربوط به شبه فاصله به صورت زیر خواهد بود [۲]:

$$PRC_r^j(t_0) = \rho_r^j(t_0) - PR_r^j(t_0) \quad (۲)$$

علاوه بر تصحیح دیفرانسیلی، نرخ تصحیح دیفرانسیلی RRC نیز محاسبه می‌شود. این پارامترها با تأخیر به ایستگاه کاربر می‌رسند و در نتیجه مقدار تصحیح برای شبه فاصله کد مربوط به ایستگاه کاربر در اپوک t و برای ماهواره j به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$PRC_u^j(t) = PRC_r^j(t_0) + RRC_r^j(t_0) \quad (۳)$$

شبه فاصله تصحیح شده در ایستگاه کاربر نیز از رابطه (۴) بدست می‌آید [۲]:

$$\hat{PR}_u^j = PR_u^j + PRC_u^j \quad (۴)$$

برای شبه فاصله حاصل از مشاهده فاز موج حامل نیز خواهیم داشت [۵]:

$$\phi_r^j(t_0) = \rho_r^j + Tr_r^j + I_r^j + O_r^j + c.(\Delta T^j - \Delta t_r) + \lambda N_r^j + M_r^j + e_\phi \quad (۵)$$

تصحیح دیفرانسیلی متناظر با شبه فاصله فاز، CPC، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$CPC_r^j(t_0) = \rho_r^j(t_0) - \phi_r^j(t_0) \quad (۶)$$

نرخ تصحیح دیفرانسیلی شبه فاصله فاز، RRC، برای اپوک t بنابر رابطه (۷) خواهد بود [۲]:

$$CPC_u^j(t) = CPC_r^j(t_0) + RRC_r^j(t_0) \quad (۷)$$

شبه فاصله فاز در ایستگاه کاربر به صورت زیر تصحیح خواهد شد [۲]:

$$\hat{\phi}_u^j = \phi_u^j + CPC_u^j \quad (۸)$$

معادلات (۱) تا (۴)، مدل‌های بنیادی برای سیستم DGPS متداول می‌باشند. این درحالی است که معادلات (۵) تا (۸) مدل‌های بنیادی برای سیستم DGPS دقیق تک مرجعی می‌باشند. اگر سطح نویز مشاهدات کد، با استفاده از مشاهدات فاز جمع‌آوری شده، بدون نیاز به رفع ابهام از آنها، کاهش یابد و به اصطلاح نرمتر شود و آنگاه در معادلات (۱) الی (۴) بکار گرفته شوند، شاهد سیستم DGPS با کدهای نرم شده با فاز خواهیم بود.

۳-۲- مشکلات و محدودیت‌های موجود در سیستم DGPS تک مرجعی

مشکلات مربوط به خطاهایی است که وجود دارد. خطاهای وابسته به زمان با لحاظ همزمانی در ارسال اطلاعات سیستم (ارسال نرخ تصحیحات دیفرانسیلی) حذف می‌شود. سیستم با در نظر گرفتن نرخ تصحیحات در واقع به نوعی سعی در حل مشکل تأخیر در دریافت تصحیحات دیفرانسیلی را دارد.

گروه دیگری از خطاها که در حوزه مکان وابستگی دارند مانند خطاهای مربوط به تروپسفر، یونسفر و خطاهای مداری با افزایش فاصله از ایستگاه مرجع دچار عدم وابستگی می‌شوند و در نتیجه از اعتبار و دقت تصحیحات کاسته می‌شود. این کاهش بطور تقریبی ۱ متر به ازای ۱۰۰ کیلومتر می‌باشد [۶]. تصحیحات DGPS موجب تخفیف این خطاها می‌شود.

خطاهای مربوط به ایستگاه، مانند چند مسیری و تغییرات مرکز فاز آنتن (pvc)، هم در ایستگاه کاربر و هم در ایستگاه مرجع وجود دارند که در ایستگاه مرجع با کالیبراسیون می‌توان تأثیر آنها را به خوبی از میان برد. ولی در ایستگاه کاربر کماکان شاهد این تأثیرات بویژه تأثیرات چند مسیری خواهیم بود [۶].

www.SID.ir

Archive of SID

با وجود پایین بودن سطح نویز و تأثیر چند مسیری در مشاهدات فاز، تکنیک DGPS دقیق که RTK[10] نیز نامیده می‌شود، دستخوش مشکلات خاصی است که در ادامه به آنها اشاره شده است.

الف) محدودیت در سیستم ارتباطی:

برای RTK زیرپیام‌های شماره ۱۸ و ۱۹ یا ۲۰ و ۲۱ از فرمت RTCM را می‌توان بکار برد. حجم بالای اطلاعات بویژه در حالت ارسال زیر پیام‌های شماره ۱۸ و ۱۹ (مشاهدات خام فاز و کد) برای نرخ اطلاعاتی[11] ۱ ثانیه‌ای، توان ارسال ۲۴۰۰ بیت بر ثانیه کافی نخواهد بود. در صورت ارسال زیر پیام‌های ۲۰ و ۲۱ که تصحیحات هستند، حجم اطلاعاتی کاهش می‌یابد ولی با این حال باید از ارسالگرهای رادیویی با توان بالا استفاده کرد که برد پایینی دارند (حداکثر ۲۵ کیلومتر) [۲، ۷].

ب) کاهش دقت و اعتبار تصحیحات ارسالی با افزایش فاصله:

تصحیحات ارسالی سیستم با افزایش فاصله از ایستگاه مرجع برای گیرنده‌های تک فرکانسه در هر ۱۰ کیلومتر ۱۰ سانتیمتر خطا تولید خواهد کرد. در مورد گیرنده‌های دو فرکانسه در هر ۱۰ کیلومتر شاهد ۲ تا ۵ سانتیمتر خطا خواهیم بود [۱].

ج- حل صحیح و سریع ابهام فاز در ایستگاه کاربر:

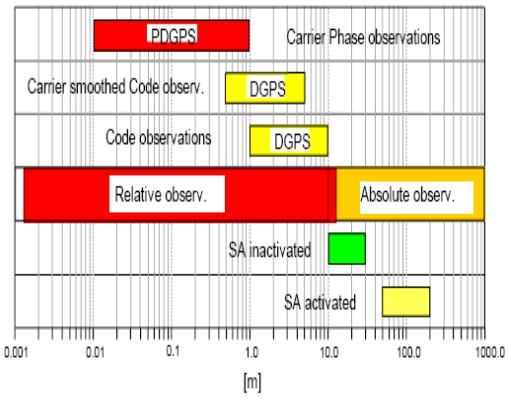
شرط لازم برای دسترسی به دقت میلیمتر و حتی سانتیمتر حل صحیح ابهام فاز در ایستگاه کاربر می‌باشد. روش‌های مختلفی برای حل ابهام فاز وجود دارد از جمله این روش‌ها، تکنیک‌های جستجو می‌باشد که می‌توانند برای حل ابهام فاز در حال حرکت نیز بکار روند، از این متدها تحت عنوان OTF[12] یاد می‌شود. اگر اعداد برآورد شده برای ابهام فاز را به صورت اعشاری رها کنیم[13] دقت درحد دسی‌متر خواهد بود. از این رو باید این اعداد اعشاری به اعداد صحیح تبدیل شوند که صحیح کردن همین اعداد[14] نیازمند زمان خواهد بود که با افزایش فاصله و رشد خطاهای وابسته به فاصله، گذشته از کاهش اعتبار روش‌های OTF، زمان لازم برای جستجوی اعداد صحیح ابهام فاز نیز افزایش خواهد یافت. با وجود این مسائل این سیستم حداکثر تا ۱۰ کیلومتر فاصله از ایستگاه مرجع معتبر خواهد بود. در ادامه نیازمندی‌های این سیستم را معرفی می‌کنیم:

الف) گیرنده‌های دو فرکانسه برای حل ابهام فاز

ب) مشاهدات کد C/A با سطح نویز پایین برای کاستن از فضای مبهم فازی و کاهش زمان جستجو

ج) قابلیت گیرنده در دریافت سیگنال از همه ماهواره‌های میدان دید. (این قابلیت برای آن است که متدهای OTF برای تعداد زیادی از ماهواره‌ها بسیار بهتر عمل می‌کنند) [۲].

شکل (۲) دقت شکل‌های مختلف سیستم DGPS و تکنیک‌های تعیین موقعیت GPS را نشان می‌دهد.



شکل ۲- پتانسیل دقت حاصل از تکنیک‌های مختلف GPS و DGPS [۳]

۴- سیستم تعیین موقعیت DGPS چند مرجعی

تأثیر نامطلوب خطاهای وابسته به فاصله با افزایش فاصله از ایستگاه مرجع بیشتر می‌شود. علت این امر نیز کاهش وابستگی خطاهای یادشده با افزایش فاصله است. برای پوشش مناطق وسیع اگر بخواهیم از این سیستم استفاده کنیم باید ایستگاه‌های مرجع منفرد زیادی پیاده و راه‌اندازی شود. برای دستیابی به دقت‌های بالا (سانتیمتری) با این سیستم جهت استفاده در ژئودزی و نقشه‌برداری نیز مد RTK تک‌مرجعی مطرح شد که درگیر مسائل عدیده‌ای است و بدان‌ها پرداخته شد.

از این‌رو سرویس DGPS برای مقاصد بالا نیازمند سیستم دیگری غیر از حالت تک مرجعی است، که مفهوم چند مرجعی در این راستا مطرح شده است. در این شیوه اطلاعات مربوط به هر ایستگاه به یک مرکز محاسبه و پردازش ارسال می‌شود. اطلاعات جمع‌آوری شده در این مرکز همراه با هم برای تولید اطلاعات سرویس سیستم برای کل منطقه تحت پوشش بکار می‌رود

[10] Real-Time kinematic
[11] Data Rate
[12] On the fly
[13] Ambiguity float solution
[14] Time to fix Ambiguity (TTFA)

www.SID.ir

Archive of SID

[۱، ۲]. این شیوه منجر به دستیابی به دقت بالاتر با پراکندگی کمتر ایستگاه‌های مرجع و پوشش بیشتر می‌شود.

در شبکه RTK، ایستگاه‌ها در سطح یک منطقه پراکنده‌اند و فاصله آنها تا ۱۰۰ کیلومتر نیز می‌تواند باشد ولی متداول است که این فاصله از ۳۰ تا ۷۰ متر باشد [۳، ۸]. ضمناً دقت در منطقه تحت پوشش تقریباً یکنواخت خواهد بود. این الگوریتم‌ها می‌توانند برداری از تصحیحات برای تک تک خطاهای موجود از قبیل خطای ساعت ماهواره و سه مؤلفه کارتزین موقعیت ماهواره، در پی داشته باشند. بردار تصحیحات می‌تواند شامل پارامترهای تصحیح برای یونسفر و تروپسفر نیز باشد [۹]. این الگوریتم‌ها، الگوریتم‌های فضای وضعیت نامیده می‌شوند. گاهی نیز الگوریتم‌ها در فضای اسکالر مشاهدات بکار گرفته می‌شوند و تصحیح اسکالر منفردی را ارائه می‌دهند. این الگوریتم‌ها، الگوریتم‌های فضای مشاهدات نامیده می‌شوند که در ادامه تنها به شرح این الگوریتم‌ها می‌پردازیم.

۴-۱- روش‌های انترپولاسیون در DGPS چند مرجعی

تعداد N ایستگاه مرجع را در نظر می‌گیریم. نماد n برای ایستگاه مرجع اصلی انتخاب شده است. نماد i نیز برای ایستگاه دلخواهی از ایستگاه‌های مرجع بکار برده می‌شود. مشاهدات تفاضلی مرتبه اول بین گیرنده را، میان هریک از ایستگاه‌های مرجع و ایستگاه اصلی مرجع، در اپوک t_0 برای مشاهدات کد و یک ماهواره دلخواه تشکیل می‌دهیم [۱۰، ۱۱]:

$$\Delta PR_{in}^{j}(t_0) = \Delta\rho_{in}^{j}(t_0) + \Delta Tr_{in}^{j}(t_0) + \Delta O_{in}^{j}(t_0) + \Delta I_{in}^{j}(t_0) + c.\Delta t_{in}^{j}(t_0) + \Delta s_{in}^{j}(t_0) \qquad (۹)$$

که در این رابطه:

$i = 1,2,\ldots,n-1$

با معلوم بودن مختصات دقیق ایستگاه‌ها، فاصله هندسی قابل محاسبه است و در نتیجه مقادیر تصحیح به صورت زیر محاسبه می‌شوند [۱۰، ۱۱]:

$$V_{in}^{j}(t_0) = \Delta PR_{in}^{j}(t_0) - \Delta\rho_{in}^{j}(t_0) \qquad (۱۰)$$

برای شبکه‌ای با n ایستگاه مرجع، مدل خطی به شکل زیر توصیف می‌شود [۱۰]:

$$\begin{bmatrix} V_{1n} \\ V_{2n} \\ \vdots \\ V_{n-1n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{1n} & \Delta Y_{1n} \\ \Delta X_{2n} & \Delta Y_{2n} \\ \vdots & \vdots \\ \Delta X_{n-1n} & \Delta Y_{n-1n} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \qquad (۱۱)$$

$\Delta X, \Delta Y$ اختلاف مختصات‌های افقی ایستگاه‌های مرجع نسبت به ایستگاه مرجع اصلی n می‌باشد. مختصات افقی، عرض و طول جغرافیایی نیز می‌توانند باشند. از این مدل در این مقاله تحت عنوان، انترپولاسیون در حوزه طول و عرض جغرافیایی (LIMxy)، یاد شده است.

پارامترهای a,b توسط مدل خطی ارائه شده، برآورد می‌شوند و به عنوان، ضرایب تصحیح شبکه، برای بهبود مشاهدات ایستگاه کاربر، ارسال می‌شوند.

با توجه به بالا بودن سطح نویز در مشاهدات کد، تنها به تشکیل مشاهدات تفاضلی مرتبه اول بسنده شد. در مورد مشاهدات فاز از مشاهدات تفاضلی مرتبه دوم استفاده می‌کنیم.

خواهیم داشت [۵]:

$$\Delta\nabla\phi_{in} = \Delta\nabla\rho_{in} + \Delta\nabla Tr_{in} + \Delta\nabla O_{in} \Delta\nabla I_{in} + \Delta\nabla s_{in} + \Delta\nabla\lambda.N_{in} \qquad (۱۲)$$

مقدار تصحیح با معلوم بودن ترم هندسی و ترم ابهام فاز به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۰، ۱۱]:

$$V_{in} = \Delta\nabla\phi_{in} - \Delta\nabla\rho_{in} _ \lambda.\Delta\nabla N_{in} \qquad (۱۳)$$

همان طور که پیداست ابتدا باید اعداد ابهام فاز صحیح شوند و سپس به همرام ترم هندسی از مشاهدات حذف شوند تا ترم تصحیحی بدست آید.

با حصول مقادیر تصحیح برای ایستگاه‌های مرجع، مقدار تصحیح برای ایستگاه کاربر مطابق با رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{un} = a.\Delta X_{un} + b.\Delta Y_{un} \qquad (۱۴)$$

$\Delta X_{un}, \Delta Y_{un}$ اختلاف مختصات افقی تقریبی ایستگاه کاربر u، با مختصات افقی ایستگاه مرجع اصلی n، می‌باشد.

باید این مطلب را به خاطرداشته باشیم که این ضرایب برای یک جفت ماهواره که مشاهدات تفاضلی مرتبه دوم بی‌ن ایستگاه‌ها با

www.SID.ir

Archive of SID

مشاهدات مربوط به آنها تشکیل شده است و در یک اپوک خاص برآورد می‌شوند.

مقدار تصحیح برای ایستگاه کاربر می‌تواند با میانگین‌گیری ساده (Mean) از مقادیر تصحیح ایستگاه‌های مرجع و یا میانگین‌گیری وزن‌دار (WMean) از آنها بر اساس فاصله از ایستگاه کاربر نیز محاسبه شود.

اختلاف ارتفاع میان ایستگاه‌ها منجر به کاهش وابستگی خطاهای وابسته به فاصله بویژه تأثیر تروپسفری، در این ایستگاه‌ها می‌شود و در نتیجه کارایی و دقت مدل خطی مورد بحث (۱۱) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای اینکه بتوان تأثیر نامطلوب اختلاف ارتفاع را رفع کرد، مدل‌های دیگری در ادامه مطرح می‌شوند.

اولین مدلی که مطرح می‌شود به صورت زیر می‌باشد:

$$V = a.\Delta H + b.\Delta D \qquad (۱۵)$$

در این مدل خطی، درون‌یابی در صفحه افقی و با مختصات افقی صورت نمی‌گیرد، بلکه در یک فضای سه بعدی و با دو مولفه فاصله افقی D و ارتفاع H انجام می‌شود. در این مقاله از این مدل تحت عنوان انترپولاسیون در حوزه فاصله افقی و ارتفاع ژئودتیکی (LIMhd) یاد شده است. حتی در سه بعد طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ژئودتیکی نیز انترپولاسیون قابل اجراست که در ادامه از آن تحت عنوان، انترپولاسیون در سه بعد (LIMxyh)، یاد می‌شود.

مدل خطی دیگری با سه پارامتر ارائه شده است (LINS):

$$V = a\Delta X + b.\Delta Y + c \qquad (۱۶)$$

مدل غیرخطی زیر نیز در رفع تأثیرات نامطلوب اختلاف ارتفاع در منطقه مؤثر است (BILS):

$$V = a\Delta X + b.\Delta Y + c\Delta X\Delta Y \qquad (۱۷)$$

مدل (۱۶) مدل برازش رویه خطی و مدل (۱۷) مدل برازش رویه دوخطی است.

مدل‌های غیر خطی دیگری نیز وجود دارند که از ذکر آنها صرف نظر شده است.

بکارگیری متدهای میانگین‌گیری و انترپولاسیون، به نوعی منجر به یک ترکیب خطی از ترم‌های تصحیحی ایستگاه‌های مرجع می‌شود که حاصل این ترکیب ترم تصحیحی ایستگاه کاربر می‌باشد [۱۰].

در متد ترکیب خطی، ضرایب ترکیب از راه دیگری محاسبه می‌شود و به صورت مستقل تحت عنوان، متد ترکیب خطی، از آن یاد می‌شود.

بردار ضرایب n بعدی $\vec{\alpha}$ را در نظر می‌گیریم که $n-1$ مؤلفه آن قرار است به صورت زیر ترم تصحیحی ایستگاه کاربر را تخمین بزند [۱۰]:

$$V_{un} = \alpha_1.V_{1n} + \alpha_2.V_{2n} + ... + \alpha_{(n-1)}.V_{(n-1)n} \qquad (۱۸)$$

این ضرایب باید در روابط زیر صدق کنند [۱۰]:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1 \qquad (۱۹)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i.(\vec{X}_u - \vec{X}_i) = 0 \qquad (۲۰)$$

$\vec{X}$ نماینده بردار افقی متناظر با هرکدام از ایستگاه‌هاست. با استفاده از رابطه (۱۹) سعی می‌کنیم تا رابطه (۲۰) را به شکل دیگری بنویسیم:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i.\Delta\vec{X}_{in} = \Delta\vec{X}_{un} \qquad (۲۱)$$

اگر رابطه (۲۱) بر اساس مؤلفه‌های بردارهای دخیل در آن نوشته شود و سپس همراه با رابطه (۱۹) به فرم ماتریسی بازنویسی شود در نهایت خواهیم داشت [۱۰]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & ... & 1 & 1 \\ \Delta X_{1n} & \Delta X_{2n} & ... & \Delta X_{n-1n} & 0 \\ \Delta Y_{1n} & \Delta Y_{2n} & ... & \Delta Y_{n-1n} & 0 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta X_{un} \\ \Delta Y_{un} \end{bmatrix} \qquad (۲۲)$$

اگر رابطه اخیر را به شکل زیر در نظر بگیریم:

$$A\vec{\alpha} = \vec{w} \qquad (۲۳)$$

در این صورت ضرایب مورد نظر از رابطه زیر محاسبه می‌شوند [۱۰]:

www.SID.ir

Archive of SID

$$\vec{\alpha} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{w} \qquad (۲۴)$$

البته برای کنترل اثرات نامطلوب اختلاف ارتفاع علاوه‌بر مؤلفه‌های افقی، مؤلفه ارتفاع ژئودتیکی نیز به مدل اضافه شد (LCMxyh).

فرم ماتریسی این مدل کارآمد، برای محاسبه ضرایب ترکیب خطی، به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 & 1 \\ \Delta X_{1n} & \Delta X_{2n} & \cdots & \Delta X_{n-1n} & 0 \\ \Delta Y_{1n} & \Delta Y_{2n} & \cdots & \Delta Y_{n-1n} & 0 \\ \Delta h_{1n} & \Delta h_{2n} & \cdots & \Delta h_{n-1n} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta X_{un} \\ \Delta Y_{un} \\ \Delta h_{un} \end{bmatrix} \qquad (۲۵)$$

۵- نتایج حاصل از بکارگیری متدهای DGPS در مشاهدات چند ایستگاه در ناحیه البرز

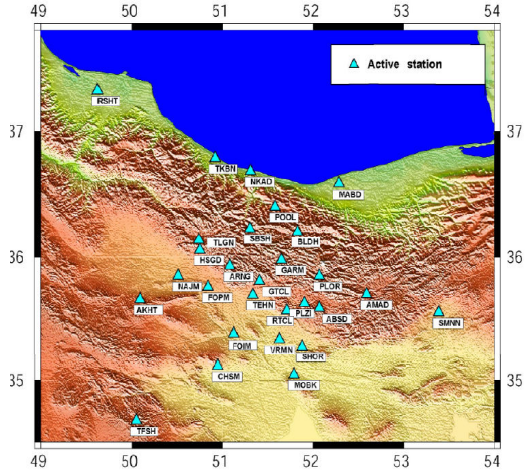
نتایج عددی حاصل از بکارگیری متدهای مورد بحث برروی مشاهدات ایستگاه‌های منطقه مرکزی البرز در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۱- شبیه‌سازی الگوریتم‌های تعیین موقعیت آنی DGPS برای بکارگیری به صورت پس پردازش

این امکان که ما الگوریتم‌ها را بصورت آنی مورد بررسی قرار دهیم وجود نداشت. اما این امکان وجود دارد که بصورت پس‌پردازش مورد بررسی قرار گیرند. در این راستا مشاهدات ۲۴ ساعت (یک شبانه روز) ۵ ایستگاه دائمی GPS در شبکه مرکزی البرز ایران بکار گرفته شده‌اند. این مشاهدات تحت فرمت RINEX می‌باشند. موقعیت این ایستگاه‌ها در ادامه نشان داده شده است. تکنیک‌های مورد نظر برای مشاهدات کد و فاز جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

نحوه پردازش و بکارگیری الگوریتم‌ها بدین صورت بود که در گام اول محتویات فایل RINEX مشاهدات برای تمام ایستگاه‌ها بوسیله برنامه کامپیوتری که در نرم‌افزار MATLAB فراهم شده بود، استخراج شد و به فرم دلخواه برای مقاصد بعدی درآمد. مختصات کارتزین ماهواره‌ها نیز در سیستم متوسط قراردادی زمینی محاسبه شد و در این فرم قرار گرفت.

حال در گام دوم، بر اساس فرمت حاصل از گام اول و روابط ریاضی که در بخش‌های پیشین به آنها اشاره شد، در هر اپوک و برای هر ماهواره، بر اساس تصحیحات ایستگاه‌های PLZI، BLDH ، GARM و AMAD با در نظر گرفتن ایستگاه AMAD به عنوان ایستگاه مرجع اصلی، مدلی برای تصحیحات بدست آمد.



شکل ۳- پراکندگی و نام ایستگاه‌های دائم شبکه تهران

جدول ۱- اسامی وموقعیت ژئودتیکی ایستگاه‌ها (ارتفاع بر حسب متر)

نام ایستگاه	AMAD	PLOR	PLZI	BLDH	GARM
عرض ژئودتیکی	35 °42′12 .5″	35 °50′58 .7″	35 °37′49 .1″	36 °12′30 .0″	35 °59′5 .9″
طول ژئودتیکی	52 °35′12 .5″	52 °3′50 .4″	51 °58′15 .6″	51 °49′43 .3″	51 °38′44 .3″
ارتفاع ژئودتیکی	2990.50*m*	2278.15*m*	1699.83*m*	2038.79*m*	2512.91*m*

www.SID.ir

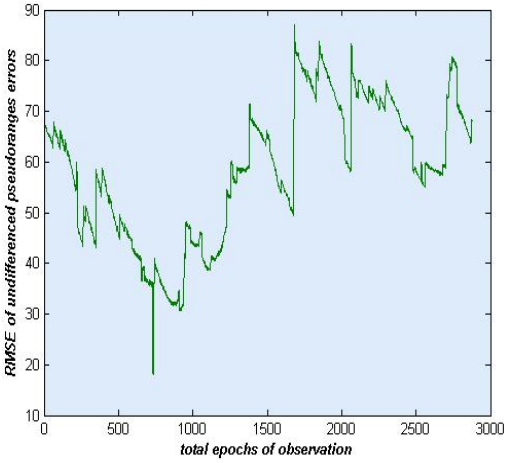
Archive of SID

بر اساس این مدل مشاهدات مربوط به ایستگاه PLOR نسبت به ماهواره متناظر با مدل، تصحیح می‌شوند و پروسه محاسبه RMSE، قبل و بعد از اعمال تصحیحات انجام و مقایسه می‌شود، که البته انتظار داریم میزان آن بعد از اعمال تصحیحات دیفرانسیلی کمتر باشد و با میزان خطاهای کمتری مواجه باشیم. این روند برای تمام اپوک‌هایی که امکان داشته باشد، به کار گرفته می‌شود. در حوزه مشاهدات فاز بجای مشاهدات تفاضلی مرتبه اول از مشاهدات تفاضلی مرتبه دوم استفاده می‌شود و در نتیجه مدل برای یک جفت ماهواره برآورد می‌شود. در حوزه مشاهدات فاز علاوه بر ترم فاصله هندسی، ترم بایاس ابهام فاز نیز باید حذف شود. در این راستا مشاهدات تفاضلی مرتبه دوم عاری از یونسفر انتخاب شد و مقدار بایاس ابهام فاز این مشاهدات پس از پردازش در نرم افزار GPS-SURVEY، از نتایج حاصل از این پردازش استخراج و از مشاهدات برداشته شد.

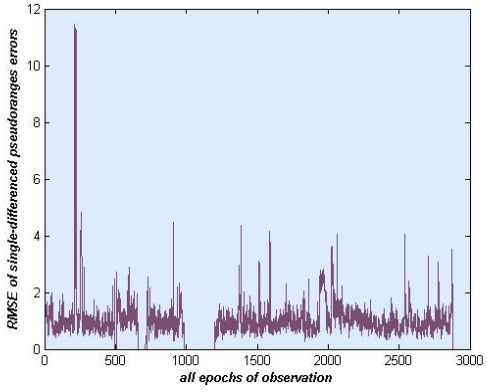
۵-۲- بکارگیری الگوریتم‌ها در فضای مشاهدات

جذر میانگین مربعات خطاها در تمام اپوک‌ها با درنظر گرفتن تمام ماهواره‌های موجود در هر اپوک، در شکل بعدی یعنی شکل چهار برای ایستگاه PLOR نشان داده شده است. این شکل پتانسیلی از خطاهایی که در حالت غیر تفاضلی در ایستگاه PLOR با آن مواجهیم نمایش می‌دهد. قصد بر این است تا با روش‌های DGPS و اعمال تصحیحات دیفرانسیلی این پتانسیل کاهش یابد. در این شکل میزان خطا از کمینه ۱۵ متر تا بیشینه ۹۰ متر متغیر است. از این پس جذر میانگین مربعات خطاها به عنوان معیار پتانسیل و حجم خطا در نظر گرفته می‌شود. چنانچه در ادامه خواهیم دید با اعمال تصحیحات دیفرانسیلی پتانسیل خطا کاهش خواهد یافت.

با اعمال تصحیحات محاسبه شده در ایستگاه AMAD به مشاهدات ایستگاه PLOR کاهش قابل توجه میزان خطا را شاهد خواهیم بود. در واقع این کاهش نشان از کارایی بالای تصحیحات DGPS در افزایش دقت و صحت مشاهدات دارد که شکل بعدی گویای این نکته می‌باشد. با بکارگیری تصحیحات، میزان خطا با در نظر گرفتن تمام اپوک‌ها از رقم ۶۰/۱۴ متر به رقم ۱/۴۴ متر کاهش پیدا می‌کند. لازم به یادآوری است که در ایستگاه مرجع هر کدام از مقادیر تصحیح در هر اپوک و برای هر ماهواره محاسبه می‌شود و در ایستگاه کاربر برای تصحیح مشاهده مربوط به همان ماهواره و در همان اپوک استفاده می‌شود. چنانچه در شکل (۵) نیز دیده می‌شود اعمال تصحیحات دیفرانسیلی به مشاهدات ایستگاه PLOR، منجر به کاهش چشمگیر میزان خطا در تمام اپوک‌های مشاهداتی شده است. البته هرچه فاصله ایستگاه‌های مرجع و کاربر بیشتر شود از میزان بهبود، کاسته خواهد شد.



شکل ۴- مقدار RMSE خطای مشاهدات غیر تفاضلی شبه فاصله کد در ایستگاه PLOR (برحسب متر)



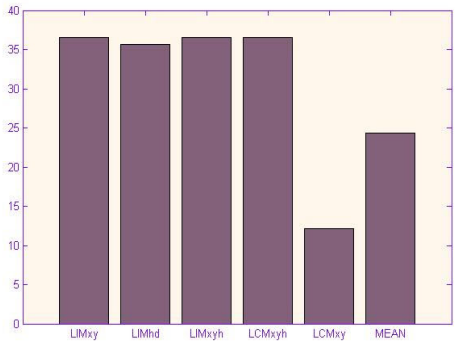
شکل ۵- خطای مشاهدات تفاضلی مرتبه اول در هر اپوک برای ایستگاه‌های PLOR و AMAD، که متناظر با میزان خطا در سیستم DGPS تک مرجعی متداول می‌باشد. (بر حسب متر)

www.SID.ir

Archive of SID

اینک نوبت به بررسی تأثیر مدل‌های شبکه‌ای می‌رسد. اسامی مدل‌هایی که بکار گرفته شدند عبارتند از: مدل انترپولاسیون خطی در حوزه طول و عرض ژئودتیک (LIMxy)، مدل انترپولاسیون خطی در حوزه فاصله افقی و ارتفاع (LIMhd)، مدل انترپولاسیون در سه بعد (LIMxyh) ، مدل ترکیب خطی در سه بعد (LCMxyh)، مدل ترکیب خطی در افق (LCMxy)، مدل میانگین‌گیری ساده (MEAN)، مدل میانگین‌گیری وزن‌دار (WMean)، مدل برازش رویه خطی (LINS) و مدل برازش رویه دوخطی (BILS). کارایی متدهای فضای مشاهدات در مناطقی که اختلاف ارتفاعی زیادی در آن وجود دارد کاسته می‌شود. برای این که بتوان در مناطق کوهستانی نیز از این متدها استفاده کرد، چنانچه در پاراگراف پایانی بخش ۴-۱ نیز اشاره شده، مؤلفه ارتفاعی نیز وارد حوزه انترپولاسون شد. شکل (۶) در حالی‌که ایستگاه AMAD به عنوان ایستگاه مرجع اصلی، و ایستگاه PLOR به عنوان ایستگاه کاربر انتخاب شدند، درصد بهبود دقت حاصل از بکارگیری این مدل‌ها را در مقایسه با تکنیک DGPS متداول نشان می‌دهد.

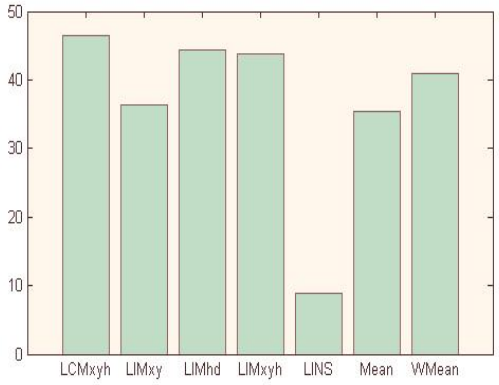
همانطور که پیداست روش‌های شبکه‌ای DGPS، ۱۰ تا ۳۸ درصد نسبت به روش DGPS تک مرجعی، بهبود دقت نشان می‌دهند. در بکارگیری مدل انترپولاسیون خطی در حوزه طول و عرض ژئودتیک (LIMxy)، مدل انترپولاسیون خطی در حوزه فاصله افقی و ارتفاع (LIMhd)، مدل ترکیب خطی در سه بعد (LCMxyh) و مدل ترکیب خطی در افق (LCMxy)، به تقریب تا ۳۸ درصد بهبود را شاهد هستیم.



شکل ۶- درصد بهبود دقت مشاهدات در روش‌های مختلف شبکه‌ای نسبت به تکنیک DGPS متداول

در ادامه ایستگاه GARM را به عنوان ایستگاه مرجع اصلی و ایستگاه AMAD را به عنوان ایستگاه تست انتخاب می‌کنیم.

در این حالت بکارگیری روش‌های شبکه‌ای بهبود دقتی که در شکل (۷) ارائه شده، نشان می‌دهند. با تغییر فاصله ایستگاه تست یا کاربر از ایستگاه مرجع اصلی نتایج حاصل از بکارگیری روش‌های مختلف نیز متفاوت خواهد بود. با این حال روش‌های شبکه‌ای در هر صورت متضمن دقت بهتری هستند بویژه روش‌هایی که به گونه‌ای مؤلفه ارتفاعی نیز در آنها دخیل است، نتایج بهتری در پی دارند.



شکل ۷- درصد بهبود دقت مشاهدات در روش‌های مختلف شبکه‌ای نسبت به تکنیک DGPS متداول

آنچه که از شکل (۷) هویداست، بهبود چشمگیر دقت مشاهدات می‌باشد که با بکارگیری روش‌های شبکه‌ای حاصل شده است. بهترین میزان بهبود دقت مربوط به روش مدل ترکیب خطی در سه بعد (LCMxyh)، است که تا ۴۷ درصد بهبود دقت را شاهد هستیم. کمترین میزان بهبود نیز مربوط به متدهای ترکیب خطی در دو بعد (LCMxy) و مدل برازش رویه خطی (LINS) است. مدل برازش رویه خطی قادر به فیلتر کردن و تخفیف نویز مشاهدات کد نیست و مدل ترکیب خطی در دو بعد (LCMxy) هم نمی‌تواند اثرات اختلاف ارتفاع در بین ایستگاه‌ها را رفع کند، از این‌رو این روش‌ها نتایج چندان رضایت‌بخشی را به دنبال ندارند.

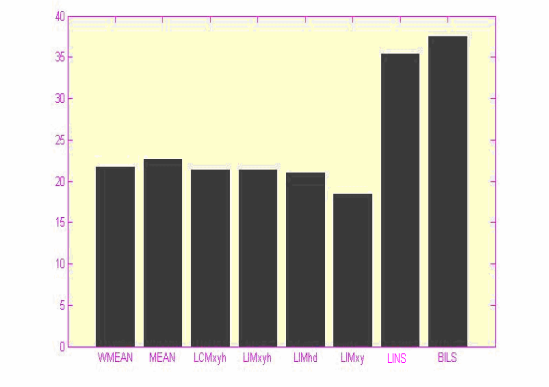
بکارگیری این الگوریتم‌ها در فضای مشاهدات فاز نتایج مندرج در شکل (۸) را در پی داشته است. در این راستا ایستگاه AMAD به عنوان ایستگاه مرجع اصلی و ایستگاه PLOR به عنوان ایستگاه

www.SID.ir

Archive of SID

کاربر انتخاب شد. در هر اپوک و برای هر جفت ماهواره، مشاهدات تفاضلی مرتبه دوم تشکیل شد. در ادامه همین مشاهدات با تصحیحات حاصل از مدل‌های مختلف تصحیح شد و میزان بهبود دقت آنها نسبت به حالت قبل از تصحیح برآورد گردید. همانطور که شاهد هستیم الگوریتم‌های شبکه‌ای تا حد ۴۰٪ نیز بهبود دقت در مشاهدات را در پی دارند. بسته به شکل شبکه، فاصله ایستگاه‌های رفرنس، سطح نویز، نوع مشاهده و موقعیت ایستگاه کاربر این رقم متفاوت خواهد بود.

چناچه مشهود است در فضای مشاهدات فاز موج حامل، برازش رویه دوخطی (BILS) و مدل برازش رویه خطی (LINS) بهترین نتایج را دارا هستند.



شکل ۸- درصد بهبود دقت مشاهدات عاری از یونسفر فاز در روش‌های مختلف شبکه‌ای نسبت به تکنیک DGPS دقیق تک‌مرجعی

۶- نتیجه‌گیری

بکارگیری روش‌های شبکه‌ای در سیستم DGPS، صحت و دقت مشاهدات را افزایش می‌دهد. با افزایش سطح نویز مشاهدات و اختلاف ارتفاع در منطقه، از کارایی این روش‌ها که در فضای مشاهدات به کار می‌روند، کاسته می‌شود. تأثیر نامطلوب اختلاف ارتفاعی زیاد در منطقه با وارد کردن مؤلفه ارتفاعی به مدل‌ها تا حد زیادی جبران می‌شود. از جمله این مدل‌ها، انترپولاسیون در حوزه دو مؤلفه فاصله افقی و ارتفاع ژئودتیک، بجای دو مؤلفه افقی طول و عرض ژئودتیک است. این مدل در عین حال که پارامتری اضافه نسبت به مدل‌های دیگر ندارد، متضمن دستیابی به دقت بالاتری نسبت به آنها است. با وارد کردن مؤلفه ارتفاعی به مدل ترکیب خطی نیز شاهد بهبود نتایج نسبت حالتی بودیم که مدل تنها از دو مؤلفه افقی بهره می‌برد. بنابر نتایج حاصل شده در فضای مشاهدات فاز موج حامل، برازش رویه دوخطی بهترین نتیجه را از جهت بهبود دقت مشاهدات در پی دارد. به نظر می‌رسد اعوجاجات رویه دو خطی به خوبی تأثیرات نامطلوب اختلاف ارتفاعی موجود در منطقه را جبران می‌کند. میزان این بهبود دقت به تقریب ۴۰ درصد می‌باشد. این در حالیست که در فضای مشاهدات کد، روش ترکیب خطی در سه بعد (LCMxyh) و روش انترپولاسیون خطی در دو بعد ارتفاعی و فاصله افقی (LIMhd) منجر به بهبود دقت بیشتری می‌شوند. میزان بهبود دقت تا ۴۷ درصد نیز می‌رسد. بنابراین استفاده از آنتن‌های چندگانه و بکارگیری روش‌های شبکه‌ای برای شبکه ملی DGPS ایران پیشنهاد می‌شود. ایجاد شبکه DGPS در سواحل ایران و استفاده از روش‌های شبکه‌ای و چند مرجعی در این شبکه‌ها متضمن دقت خوبی در تعیین موقعیت در دریاست و علاوه بر آن استانداردهای ناوبری نیز بهبود خواهد یافت. انتخاب روش خاص شبکه‌ای نیز بستگی به شرایط ارتفاعی منطقه، موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مرجع و نوع مشاهدات خواهد داشت.

نمادها

ρ	فاصله هندسی
I	تأثیر یونسفری
Tr	تأثیر تروپسفری
M	خطای چند مسیری
e	نویز مشاهدات
o	خطای مداری
N	عدد ابهام فاز
λ	طول موج حامل سیستم GPS
ΔT	خطای ساعت ماهواره
Δt	خطای ساعت گیرنده
s	خطای ایستگاهی
c	سرعت نور

مراجع

[1] Hoffman- Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J, (1992), Global Positioning

www.SID.ir

Archive of SID

System: Theory and Practice, Springer.Wien.Newyork

[2] Seeber G, (2003), Satellite geodesy: foundations, methods and applications, Walter de Gruyter.Berlin.New york

[3] Seeber G, (2000), real-time satellite positioning on the centimeter level in the 21st century using permanent reference stations, Nordic geodetic sunmmerschool, Fevik, Norway

[4] Bartone C, Shetty R, (2003), A Real-time Bi-directional differential GPS, Ohio university, Avionics Engineering center, NASA ICNS Workshop

[5] Cina A, Manzino A M, Roggero M, (2004), multistation estimating of GPS signal atmospheric delays by undifferenced observations, Dept. of Georesource and Territory, Politecnico di Torino, C.so Duca Degli Abruzzi 24, 10129 Torino, IT, commission I, WG I/5.

[6] Ketchum G, Lemmon J, Hoffman J R, (1997), site selection and installation guidelines for a nation wide DGPS service, Department of Defense (DOT) USA

[7] RTCM, 2004, Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Version 3.0.

[8] Vollath, U., A. Buecherl, H. Landau, C. Pagels, (2001), Long-Range RTK Positioning Using Virtual Reference Stations, KIS-2001.

[9] Abousalem M, Lusin S, Desalas J, (2000), Performance analysis of global posisioning using WAAS and EGNOS, GNSS Conference 2000, Edinburgh, Scotland.

[10] Dai L, Han S, Wang J, Rizos C ,(2001), comparison of interpolation algorithms in network-based GPS techniques, school of surveying & spatial information systems, The university of new south Wales, Sydney, Australia.

[11] Tominago T, Gomi Y, Kubo N, Yasuda A, (2005), The inospheric effect on ambiguity resolution in network RTK, published in proceeding of WSANE, Daejeon, Korea.

www.SID.ir