نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال ششم، شماره نخست، بهار ۱۳۹۷

Vol.6, No.1, Spring 2018

٤٥-٥٦

تعیین مقادیر اریب تفاضلی کد گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران با استفاده از تغییرات هندسه مشاهدات تفاضلی یگانه

پرویز نعمتی‌پور[۱]، مهدی روفیان نائینی[۲*]، یزدان عامریان[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

۲- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

۳- استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۶/۰۳/۰۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۴

چکیده

اریب تفاضلی کد (DCB) ماهواره‌ها و گیرنده‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)، یکی از مهم‌ترین منابع خطا در تعیین موقعیت و مدل‌سازی محتوی الکترونی کلی (TEC) یونسفر با استفاده از مشاهدات کد GPS می‌باشد. سرویس بین‌المللی سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (IGS)، مقدار این کمیت را برای ماهواره‌های GPS و گیرنده‌های شبکه IGS، در قالب مدل‌سازی جهانی یونسفر، محاسبه و منتشر می‌کند. تعیین کمیت DCB گیرنده‌های GPS در شبکه‌های منطقه‌ای و محلی به‌صورت مستقل از مدل‌سازی یونسفر، دارای کاربردهای بسیاری می‌باشد. در این مقاله، DCB گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران (IPGN) به روشی جدید و مستقل از مدل‌سازی منطقه‌ای یونسفر محاسبه شده است. ایده¬ی این روش بر مبنای استفاده از تغییرات فاصله‌ی هندسی بین ماهواره‌ها و گیرنده‌های GPS استوار است. بدین منظور از مشاهدات تفاضلی یگانه بین دو گیرنده و یک ماهواره استفاده می‌گردد. در این روش اختلاف TEC بین مشاهدات تفاضلی یگانه به صورت تابعی خطی از اختلاف فاصله‌ی بین دو گیرنده و ماهواره در نظر گرفته می‌شود. سپس سری زمانی تغییرات فاصله بین دو گیرنده و ماهواره بررسی و در زمانی که اختلاف این دو فاصله صفر می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که اثر اختلاف TEC مربوط به دو ایستگاه در معادلات تقریباً ناچیز بوده و این اختلاف از معادلات حذف می‌گردند. بنابراین اختلاف باقیمانده در معادلات، مربوط به اختلاف DCB دو گیرنده خواهد بود. روش پیشنهادی ابتدا بر روی شبکه‌ای متشکل از ایستگاه‌های IGS پیاده‌سازی و مقادیر حاصل برای DCB گیرنده‌ها با مقادیر منتشر شده توسط مراکز مختلف محاسباتی و همکار IGS مقایسه گردید. حداکثر اختلاف بین DCB برآورد شده و DCB منتشره توسط IGS کمتر از ۰٫۶ نانوثانیه و مربع خطای باقیمانده (RMSE) برابر ۰٫۴نانوثانیه می‌باشدکه حاکی از کارآیی بالای این روش در محاسبه پارامتر DCB گیرنده‌های GPS می‌باشد. سپس مقادیر DCB گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران با استفاده از روش ارائه شده محاسبه گردید. که می‌تواند به‌عنوان یک محصول مورد استفاده کاربران قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: اریب تفاضلی کد، مشاهدات تفاضلی یگانه، محتوی الکترونی کلی

* نویسنده مکاتبه کننده: : تهران، خیابان ولیعصر، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک

تلفن: ۰۹۳۸۲۸۶۲۸۳۷

Email: mraoofian@kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی[1](GNSS) به‌طور گسترده به منظور مطالعه و پایش جو زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها با هدف تعیین موقعیت نقاط زمینی در یک سیستم زمین مرجع طراحی شده و اندازه‌گیری در آنها با استفاده از امواج الکترومغناطیسی صورت می‌پذیرد. از آنجا که امواج ارسالی از ماهواره‌های این سیستم‌ها در مسیرشان از جو زمین عبور می‌کنند، لذا ساختار فیزیکی جو بر الگوی انتشار آنها تاثیر می‌گذارد. این اثرات به نوبه خود می‌توانند سبب تغییر در سرعت انتشار و دیگر ویژگی‌های مربوط به سیگنال ارسالی گردند. به‌منظور دستیابی به تعیین موقعیت دقیق، باید این اثرات را مدنظر قرار داد و به گونه‌ای مقدار آنها را تعیین نمود. امروزه با استفاده از تلفیق مشاهدات و تکنیک‌های پردازش سیگنال، برآورد دقیق این اثرات امکان‌پذیر شده است. با محاسبه‌ی اثرات جو بر انتشار سیگنال‌های مربوطه، علاوه بر افزایش دقت تعیین موقعیت، می‌توان از این اثرات به‌عنوان ابزاری جهت توموگرافی جو زمین و تخمین خصوصیات فیزیکی آن استفاده نمود.

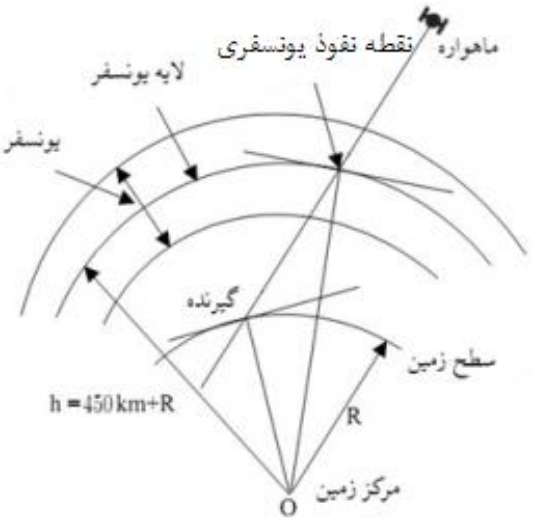
در یک تقسیم‌بندی کلی، جو زمین از دو بخش تشکیل شده است که تحت عنوان یونسفر و تروپوسفر شناخته شده و هریک اثرات متفاوتی بر انتشار امواج دارند. بیشترین اثرات بر تعیین موقعیت به واسطه یونسفر ایجاد می‌شود. از آنجا که لایه‌ی یونسفر یک محیط پاشنده[2] می‌باشد، در نتیجه امواج الکترومغناطیس هنگام عبور از این لایه دچار تأخیر و تقدم خواهند شد. یونسفر زمین ساختار فیزیکی پیچیده‌ای دارد. این محیط، لایه‌ای از الکترون‌ها و ذرات باردار بوده و از ارتفاع ۵۰ کیلومتر تا ۱۰۰۰ کیلومتر گسترده شده است. وجود الکترون‌ها و ذرات باردار در این ناحیه، عامل اصلی اثرات یونسفر بر انتشار سیگنال است و لذا یکی از پارامترهای فیزیکی مهم در این مسئله، چگالی الکترونی است. بر این اساس، مدل‌های یونسفری مختلف به‌منظور تخمین این کمیت به صورت تابعی از مکان و زمان ارائه شده‌اند[۴,۳,۲,۱ و ۵] . این مدل‌ها به‌صورت‌های جهانی و محلی ارائه‌شده و بر مبنای مشاهدات مستقیم چگالی الکترونی به‌کمک یونوسوند یا از طریق مشاهدات سیستم‌های ناوبری جهانی به‌دست می‌آیند.

یکی از مهترین سیستم‌های ناوبری جهانی، سیستم تعیین موقعیت جهانی[3](GPS) است. این سیستم متشکل از ۳۲ ماهواره بوده که در ۶ صفحه مداری با زاویه میل ۵۵ درجه به دور زمین دوران نموده و یک پوشش جهانی برای تعیین موقعیت در هر نقطه از زمین فراهم می‌نمایند. در چند دهه اخیر مشاهدات GPS نقش بسزایی در ارائه‌ی مدل‌های محل یونسفری و همچنین بهبود نتایج مدل‌های جهانی داشته است [۶و ۷].

در مطالعه‌ی یونسفر به کمک مشاهدات GPS، کمیتی تحت عنوان محتوی الکترونی کلی(TEC)[4] تعریف می‌گردد. این کمیت برابر مجموع الکترون‌های آزاد از ماهواره تا گیرنده در یک سطح مقطع یک متر مربعی بوده و موجب تأخیر در مشاهدات کد و تقدم در مشاهدات فاز GPS می‌گردد. به کمک مشاهدات حاصل از گیرنده‌های دو فرکانسه می‌توان این اثر را از مشاهدات حذف نمود. از طرف دیگر، مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه این امکان را فراهم نموده‌اند که بتوانیم مقدار TEC را در نقاطی موسوم به نقاط نفوذ یونسفری(IPP)[5] محاسبه نماییم (شکل (۱)).

[1] Global Navigation Satellite System: GNSS
[2] Dispersive
[3] GPS
[4] Total Electron Contetnt: TEC
[5] Ionospheric Pierce Point: IPP

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]



شکل ۱: نمایی از یونسفر و نقطه نفوذ یونسفری [۸]

پارامتر و خطاهای وابسته به هندسه، نظیر فاصله هندسی بین ماهواره و گیرنده، تأخیر تروپوسفری، خطای ساعت ماهواره و گیرنده را می‌توان به کمک ترکیب خاصی از مشاهدات GPS تحت عنوان ترکیب مستقل از هندسه[1] حذف نموده و از این ترکیب جهت برآورد TEC استفاده کرد [۹و ۱۰]. تأخیر یونسفری، اریب تفاضلی کد(DCB)[2] ماهواره و اریب تفاضلی کد گیرنده، اثراتی هستند که در ترکیب مستقل از هندسه باقی می‌مانند.

میزان خطای ناشی از نادیده گرفتن DCB ماهواره و گیرنده در محاسبه TEC می تواند تا چندین متر نیز افزایش یافته و حتی منجر به وجود مقادیر منفی TEC در محاسبات شود[۱۱]. بنابراین محاسبه DCB ماهواره و گیرنده یکی از مراحل اصلی مدل‌سازی یونسفر با استفاده از داده‌های GPS می‌باشد. در فرآیند مدل سازی یونسفر فرض می‌شود که DCB ماهواره و گیرنده به ترتیب دارای ثبات ماهانه و چند روزه می‌باشند[۱۱و۱۲]. در حالی‌که در واقعیت این مقادیر دارای تغییرات روزانه می‌باشند [۱۳]. معمولاً مقادیر DCB ماهواره و گیرنده، طی فرآیند مدل‌سازی یونسفر با استفاده از روش کمترین مربعات برآورد می‌گردند [۱۴و ۱۵]. در این روش، از ضخامت یونسفر صرف نظر شده و الکترون‌های آزاد این لایه بر روی یک پوسته کروی در یک ارتفاع ثابت متراکم فرض می‌گردند. سپس TEC در امتداد مسیر گذر امواج GPS به وسیله تابع تصویر به TEC در امتداد زنیت تبدیل می‌شود [۹, ۱۱, ۱۲, ۱۶و ۱۷]. در نتیجه، محاسبه DCB در این روش به مدل‌سازی یونسفر وابسته بوده و محاسبه این مقادیر به صورت مستقل امکان پذیر نمی باشد[۱۸]. اریکان و همکاران با استفاده از الگوریتم IONOLAB-BIAS، DCB تک ایستگاه را با استفاده از مقادیر TEC محاسبه نمودند که اختلاف روش ارائه شده در مقایسه باDCB منتشره توسط IGS زیر ۱/۵ نانوثانیه بود [۹]، ماخف و همکاران از الگوریتم شبکه عصبی برای مدلسازی DCB استفاده نمودند [۱۹]. فرزانه و همکاران از تابع اسلپین کروی جهت برآورد DCB گیرنده و ماهواره‌های GPS در یک شبکه منطقه‌ای متشکل از ایستگاه های IGS استفاده نمودند و نتایج با مقادیر منتشره توسط IGS مقایسه گردید [۲۰]. کشین با استفاده از نقشه‌های TEC منتشره توسط IGS، DCB تک ایستگاه را محاسبه نمود که نتایج در مقایسه با DCB ارائه شده توسط IGS دارای اختلاف در حدود ۰/۳-۰/۱ نانوثانیه بود[۲۱]. وتلت و همکاران با استفاده از مشاهدات ماهواره ارتفاع سنجی، DCB گیرنده و ماهواره‌های GPS را برآورد نمودند که نتایج در مورد ماهواره های GPS در مقایسه با مقادیر منتشره توسطIGS مطابقت بهتری نسبت به گیرنده‌های GPS داشت[۲۲]. مانتن براک و همکاران با استفاده از مشاهدات گیرنده های GNSS و نقشه‌های جهانی یونسفر به محاسبهDCB پرداخته‌اند[۲۳]. روش‌های ارائه شده فوق به‌منظور محاسبه‌ی DCB، نیازمند محاسبه و مدلسازی TEC نیز می‌باشد و به‌طور مستقل مقادیر DCB را ارائه نمی‌دهند.

[1] Geometry Free
[2] Differential Code Biase: DCB

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]

سرویس بین‌المللی GNSS[1](IGS) به‌صورت روزانه DCB-های مربوط به ماهواره‌های GNSS و بیشتر ایستگاه‌های IGS را در قالب مدل‌سازی جهانی یونسفر محاسبه و منتشر می‌کند اما با این وجود دو مسأله در این زمینه مطرح است [۱۳]: اول اینکه DCB تمام ایستگاه‌های IGS توسط این سرویس محاسبه نمی‌شوند و دوم اینکه DCB گیرنده‌های شبکه‌های منطقه‌ای و محلی GNSS که جزء شبکه IGS نیستند، توسط این سرویس محاسبه و منتشر نمی‌گردد.

به‌منظور حل مسائل فوق در این مقاله از یک روش مستقل از مدل‌سازی یونسفر به‌منظور تعیین DCB-های گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران(IPGN)[2] بر مبنای استفاده از تغییرات هندسه مشاهدات تفاضلی یگانه بین گیرنده‌ها و ماهواره‌ها استفاده می‌شود[۱۸]. در این روش اختلاف TEC بین مشاهدات تفاضلی یگانه به صورت تابعی خطی از اختلاف فاصله بین دو گیرنده و ماهواره در نظر گرفته می‌شود. سپس سری زمانی تغییرات فاصله بین دو گیرنده و ماهواره بررسی و در زمانی که اختلاف این دو فاصله صفر می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که اثر اختلاف TEC مربوط به دو ایستگاه در معادلات تقریباً ناچیز بوده و این اختلاف از معادلات حذف می‌گردند. بنابراین اختلاف باقیمانده در معادلات، مربوط به‌اختلاف DCB دو گیرنده خواهد بود و با معلوم بودن مقدار DCB یکی از گیرنده‌های شبکه، مقدار DCB سایر گیرنده‌ها به‌دست خواهد آمد. به‌منظور ارزیابی روش فوق، ابتدا این الگوریتم بر روی برخی از ایستگاه‌های شبکه‌ی IGS پیاده‌سازی شده و اختلاف مقادیر DCB حاصل از روش پیشنهادی با مقادیر منتشر شده محاسبه می‌گردد. نتایج حاصل نشان دهنده تطابق بالای مقادیر داشتند.

در گام بعدی با توجه به اینکه مقدار DCB گیرنده ایستگاه تهران توسط IGS منتشر می‌شود، از روش فوق مقدار این کمیت برای سایر گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران تعیین می‌گردد.

۲- روش محاسبه DCB گیرنده ها با استفاده از تغییرات هندسه مشاهدات تفاضلی یگانه

اساس این روش بر مبنای استفاده از مشاهدات تفاضلی یگانه استوار است. لذا ابتدا به مرور معادلات مشاهدات شبه فاصله کد[3] و فاز موج حامل[4] می‌پردازیم. معادلات مشاهدات کد و فاز موج حامل به ترتیب به‌صورت رابطه‌های (۱ و ۲) است [۱۴]:

در این رابطه‌ها P شبه‌فاصله‌ی اندازه گیری شده، L مشاهده فاز موج حامل ، ρ فاصله هندسی بین ماهواره و گیرنده، d_{trop} خطای تروپوسفر، d_{ion} خطای یونسفر ، δt^s و δt_r به ترتیب خطای ساعت ماهواره و گیرنده، d^s و d_r اریب وابسته به فرکانس ماهواره و گیرنده، C سرعت نور در خلا ، N ابهام فاز موج حامل و ε نویز اندازه گیری‌ها می‌باشد. همچنین اندیس $k=\{1,2\}$ به فرکانس موج حامل ،اندیس s به‌ماهواره و اندیس r به گیرنده اشاره دارند. با استفاده از مشاهدات در دو فرکانس $f_{L_1}=1575.42MHz$ و $f_{L_2}=1\ \ 2\ \ 2\ M$ تأخیر یونسفری را می توان از ترکیب خطی مستقل از هندسه کد (P4) و همچنین ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز (L4) به‌صورت رابطه (۳) محاسبه نمود:

[1] International GNSS Servic:IGS
[2] Iranian Permanent GPS Network: IPGN
[3] Code Pseudorange Observations
[4] Carrier Phase Observations

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]

$$P^s_{k,r} = \rho^s_{0,r} + c(\delta t_r - \delta t^s) + d^s_{trop,r} + d^s_{ion,k,r} + d^s_k + d_{k,r} + \varepsilon^s_{P,k,r}$$ رابطه (۱)

$$L^s_{k,r} = \rho^s_{0,r} + c(\delta t_r - \delta t^s) + d^s_{trop,r} - d^s_{ion,k,r} - \lambda(b^s_{k,r} + N^s_{k,r}) + \varepsilon^s_{L,k,r}$$ رابطه (۲)

$$P_4 = P^s_1 - P^s_2 = (d^s_{ion,r1} - d^s_{ion,r2}) + DCB^s + DCB_r$$ رابطه (۳)

$$L_4 = L^s_{1,r} - L^s_{2,r} = -(d^s_{ion,1,r} - d^s_{ion,2,r}) - \lambda(b^s_{1,r} + b^s_{2,r}) - \lambda(N^s_{1,r} + N^s_{2,r})$$ رابطه (۴)

در روابط فوق $DCB^s = d^s_1 - d^s_2$ و $DCB_r = d_{1,r} - d_{2,r}$ به ترتیب به اریب تفاضلی کد ماهواره و اریب تفاضلی کد گیرنده که به ترتیب ناشی از تاخیر سخت افزاری ماهواره و گیرنده می‌باشند، اشاره دارند. با توجه به اینکه اثر یونسفر در مشاهدات کد باعث تأخیر و در مشاهدات فاز باعث تقدم می‌گردد، لذا از جمع دو رابطه فوق خواهیم داشت (رابطه (۵)):

$$P^s_{4,r} + L^s_{4,r} = DCB^s + DCB_r - \lambda(b^s_{1,r} + b^s_{2,r}) - \lambda(N^s_{1,r} + N^s_{2,r})$$ رابطه (۵)

به‌دلیل بالا بودن نویز مشاهدات کد و وجود ابهام فاز در مشاهدات فاز امکان استفاده مستقل از هر یک از این مشاهدات در محاسبه‌ی مشاهده‌ی مستقل از هندسه وجود ندارد، لذا به منظور بهره‌مندی از مزایای هر دو مشاهده، مشاهدات کد با استفاده از مشاهدات فاز به صورت زیر نرم می‌شوند [۲۴]. برای این منظور بازه‌ی زمانی که در آن جهش فاز رخ نداده و ابهام فاز ثابت می‌باشد و کمان پیوسته‌ی مشاهداتی نامیده می‌شود را در نظر گرفته و مشاهده $\Phi^s_{4,r}$ (ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز) هر اپک[1] از میانگین رابطه فوق کسر می‌شود (رابطه (۶)):

$$P^s_{4,r} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(P^s_{4,r} + \Phi^s_{4,r})_j - \Phi^s_{4,r}$$ رابطه (۶)

در این رابطه $P^s_{4,r}$ ترکیب خطی مستقل از هندسه کد نرم شده با مشاهده فاز[2] برای ماهواره s و گیرنده r می‌باشد.

فرایند نرم نمودن مشاهدات یونسفری کد با استفاده از مشاهدات یونسفری فاز در یک کمان پیوسته مشاهداتی یعنی در بازه زمانی که در آن جهش فاز رخ نداده و در نتیجه ابهام فاز ثابت است، صورت می‌پذیرد.

پس لازم است که اپک وقوع جهش فاز مشخص گردد تا فرایند نرم نمودن مشاهدات یونسفری کد برای قبل و بعد از این اپک به‌صورت مجزا انجام پذیرد. در این تحقیق از تفاضل مشاهدات شبه فاصله کد و فاز موج حامل برای هر یک از دو موج حامل L_1 و L_2 به‌منظور کشف جهش فاز استفاده شد[۶].

درنهایت با ترکیب دو رابطه اخیر، به رابطه زیر که در آن I^s_r تأخیر یونسفری می‌باشد، می‌رسیم:

$$P^s_{4,r} = F.I^s_r + DCB^s + DCB_r$$
$$F = 1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}$$ رابطه (۷)

مشاهده کد تفاضلی یگانه‌ی نرم شده با مشاهده فاز[3]، از مشاهده همزمان از دو گیرنده i و j به ماهواره s تشکیل می‌شود. در نتیجه خطاهای وابسته به ماهواره حذف می شوند [۱۸]. بنابراین برای مشاهده‌ی تفاضلی خواهیم داشت

رابطه (۸)

$$P^s_{4,ij} = F.I^s_{ij} + \Delta b_{ij}$$
$$\Delta b_{ij} = DCB_i - DCB_j$$
$$I^s_{ij} = I^s_i - I^s_j$$

[1] Epoch
[2] Phase-Smoothed P-Code
[3] Single-Difference Geometry-Free Phase-Smoothed P-code: SD-GSC

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]

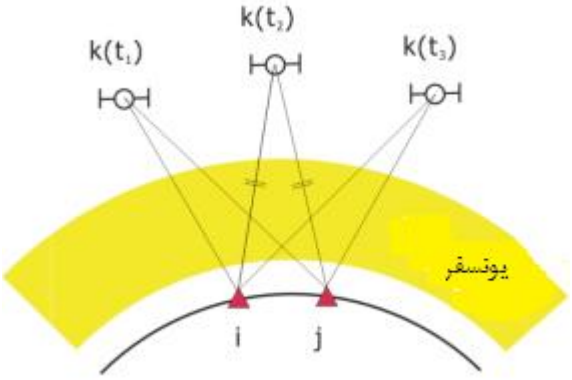
$P^{s}_{4,ij}$ که در آن مشاهده تفاضلی یگانه خطی مستقل از هندسه کد نرم شده با مشاهده فاز و I^{s}_{ij} تأخیر یونسفری تفاضلی یگانه[1] می‌باشد.

ایده اصلی این روش جهت محاسبه DCB بر این اصل استوار است که تأخیر یونسفری تفاضلی یگانه در مشاهدات SD-GSC (معادلات۸) تنها وابسته به فاصله تفاضلی یگانه[2] بین دو گیرنده و ماهواره می‌باشد که این وابستگی با معادله خطی به‌صورت زیر بیان می‌گردد [۱۸]:

$$I^{s}_{ij}(t) = \alpha R^{s}_{ij}(t) + \beta$$

رابطه (۹)

که در آن $R^{s}_{ij}(t)$ معرف فاصله‌ی تفاضلی یگانه و α و β پارامترهای مدل بوده و از طریق مشاهدات، مقادیر آنها تعیین می‌گردد. شکل (۲) تغیرات فاصله بین ماهواره k و گیرنده‌های i و j را در اپک‌های زمانی (t_1, t_2, t_3) نشان می‌دهد.



شکل ۲: تغییرات فاصله هندسی تفاضلی یگانه نسبت به زمان های (t_1, t_2, t_3) [۱۸]

با توجه به شکل ۲)، ملاحظه می‌شود که فاصله هندسی بین ماهواره و دو گیرنده در حالت تفاضلی یگانه متغیر است و از آنجا که تأخیر یونسفری وابسته به مدت زمان سیر سیگنال در لایه یونسفر است، لذا با تقریب بسیار خوبی می‌توان فرض کرد که اگر مدت زمان سیر سیگنال تا دو گیرنده برابر باشد، تأخیر یونسفری نیز در این دو مسیر برابر خواهد بود. یعنی با در نظر گرفتن رابطه (۹)، اگر در یک اپک زمانی مشخص مقدار $R^{s}_{ij} = 0$ باشد، آنگاه مقدار $I^{s}_{ij} = 0$ است و مقدار $P^{s}_{4,ij}$ در این حالت ناشی از اختلاف اریب تفاضلی کد دو گیرنده خواهد بود [۱۸]. به‌عنوان مثال در شکل ۲ در اپوک t_2 تأخیر یونسفری تفاضلی یگانه صفر می‌باشد.

قدم اول در محاسبه DCB گیرنده با روش مطرح شده در این مقاله تشکیل خطوط مبنا[3] شبکه GPS می‌باشد. در مرحله بعد بازه پیوسته‌ای از مشاهدات SD-GSC برای هر خط مبنا به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که حائز شرایط زیر باشد[۱۸]:

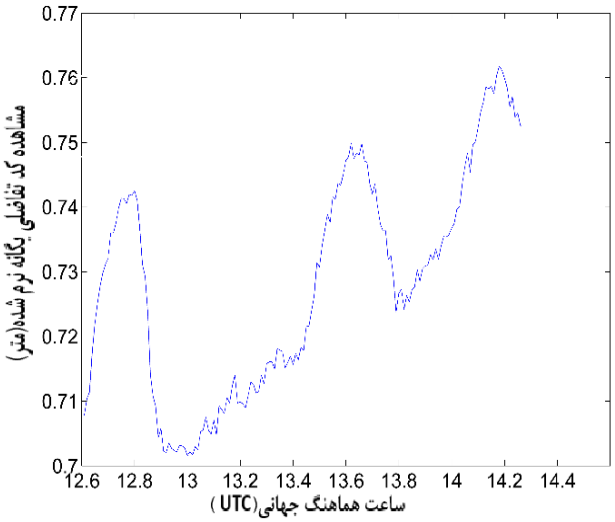
۱-فاصله تفاضلی یگانه در بازه پیوسته مشاهداتی در یک اپک خاص از این بازه پیوسته صفر باشد.

۲- ضریب همبستگی بین مشاهدات SD-GSC و فاصله تفاضلی یگانه بزرگتر از۰/۷ باشد.

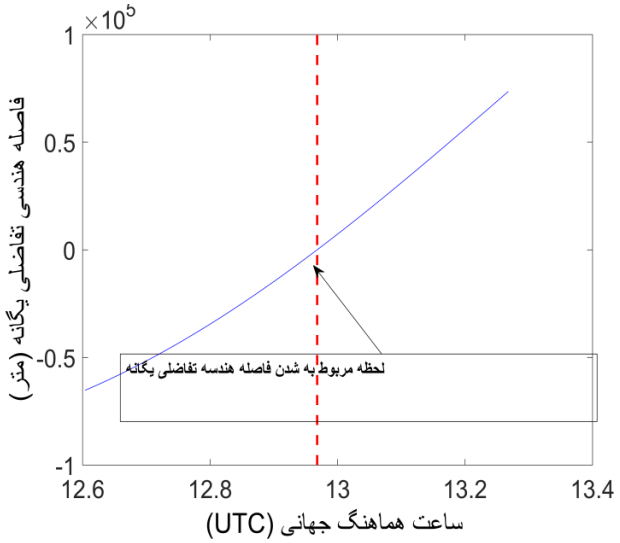
شکل (۳) یک بازه پیوسته از مشاهدات SD-GSC برای ماهواره‌ی شماره ۶ و دو ایستگاه FFMJ و HUEG از شبکه جهانی IGS و شکل (۴) تغییرات فاصله تفاضلی یگانه مربوط به شکل(۳) را نشان می‌دهد.

[1] SD Ionospheric Delay
[2] Single-Difference Geometric Ranges: SD-GR
[3] BaseLines

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]



شکل ۳: تغییرات مشاهده SD-GSC نسبت به زمان (PRN:6,baseline:FFMJ-HUEG)



شکل ۴: منحنی فاصله هندسی تفاضلی یگانه(PRN:6,baseline:FFMJ-HUEG)

با بررسی اشکال فوق، دیده می‌شود که تغییرات فاصله هندسی و تغییرات مشاهده SD-GSC، از الگوی مشابهی تبعیت می‌کنند. خط چین قرمز رنگ، اپک زمانی مورد نظر را نشان می‌دهد (صفر شدن فاصله تفاضلی). حال با تلفیق روابط (۸ و ۹) خواهیم داشت:

رابطه (۱۰)

$$E\{\mathrm{P}_{ij}^{s}(t)\} = F\{\alpha R_{ij}^{s}(t) + \beta\} + \Delta b_{ij}$$

که در این رابطه E اپراتور امید ریاضی می‌باشد.

اگر در یک اپک خاص از کمان پیوسته مشاهداتی، فاصله تفاضلی یگانه صفر شود، در این‌صورت در این اپک خاص مقدار I_{ij}^{s} صفر خواهد شد لذا می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} \mathrm{I}_{ij}^{s}(\mathrm{t}_0) = 0, \\ R_{ij}^{s}(t_0) = 0 \end{cases} \Rightarrow \beta = 0$$

رابطه (۱۱)

با ترکیب روابط (۱۰ و ۱۱) می توان نتیجه گرفت که:

رابطه (۱۲)

$$E\{\mathrm{P}_{ij}^{s}(t)\} = \begin{bmatrix} F.R_{ij}^{s}(t) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \Delta b_{ij} \end{bmatrix}$$

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]

که مقادیر Δb_{ij} و α باید برآورد شوند. باید این نکته مورد توجه قرار گیرد که رابطه (۱۲) در صورتی برقرار است که اپک خاصی مثل t_0 در بازه پیوسته مشاهداتی وجود داشته باشد. بعد از محاسبه‌ی Δb_{ij} مربوط به شبکه GPS، با معلوم بودن DCB حداقل یکی از ایستگاه‌های شبکه، با استفاده از روش کمترین مربعات، DCB سایر ایستگاه‌ها به‌صورت زیر برآورد می‌شوند [۱۸]:

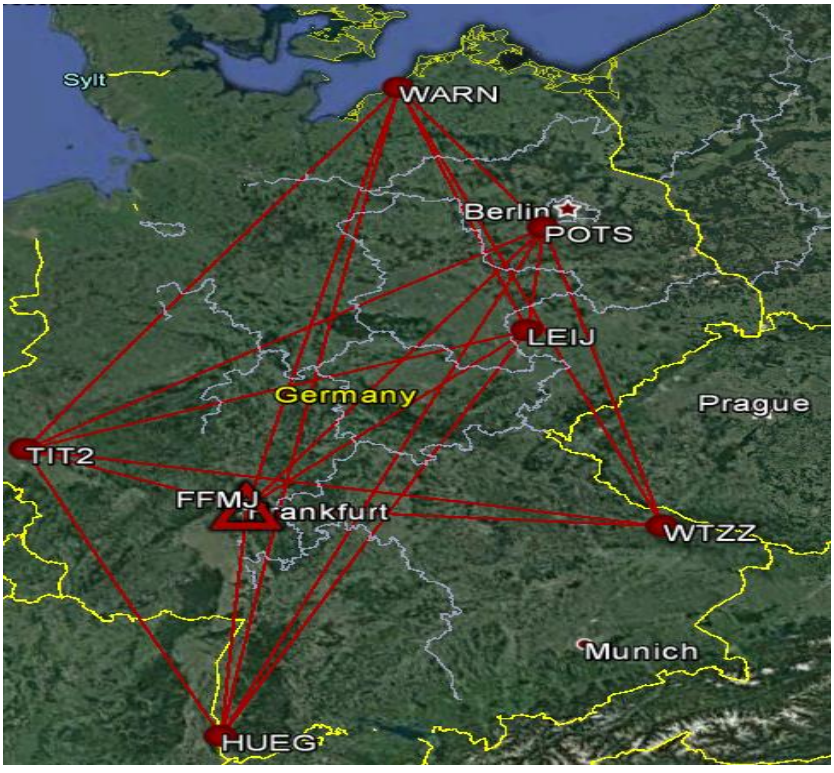
$$E\left\{\begin{bmatrix}\overline{\Delta b_{ij}}\\ \overline{\Delta b_i}\end{bmatrix}\right\}=\begin{bmatrix}1 & -1\\ 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta b_i\\ \Delta b_j\end{bmatrix}$$

رابطه (۱۳)

که در آن $\overline{\Delta b_{ij}}$، DCB تفاضلی یگانه شبکه، $\overline{\Delta b_i}$، DCB مجهول ایستگاه j، DCB معلوم ایستگاه i می‌باشد.

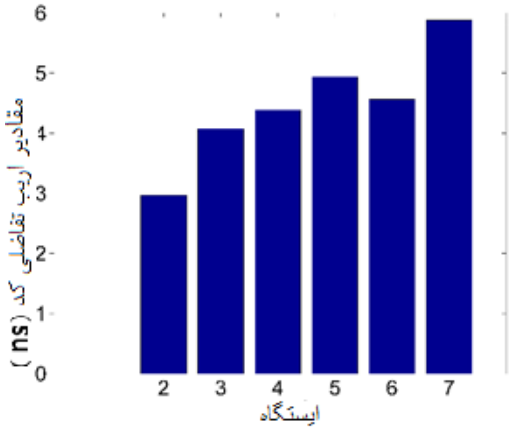
۳- نتایج عددی

روش پیشنهادی می‌تواند برای محاسبه DCB گیرنده‌ها، در یک شبکه محلی‌های و جهانی GNSS مورد استفاده قرار گیرد [۱۸]. به‌منظور ارزیابی الگوریتم معرفی شده، ابتدا یک شبکه با استفاده از ایستگاه‌های IGS تشکیل داده و DCB گیرنده‌های آن در تاریخ ۲۰۱۶/۱۱/۱۹ محاسبه گردید. شکل این شبکه و خط مبناهای تشکیل شده آن در شکل (۵) نمایش داده شده‌اند. سپس DCBهای محاسبه شده با روش پیشنهادی با DCBهای محاسبه و منتشر شده توسط IGS برای این گیرنده‌ها مقایسه گردید که نشان‌دهنده‌ی انطباق بالای نتایج حاصل از الگوریتم با مقادیر IGS می‌باشد. شکل (۶)، نتایج الگوریتم مذکور در محاسبه DCB برای ایستگاه‌های IGS را نشان می‌دهد. در اینجا مقدار DCB در ایستگاه مرجع ۱ (ایستگاه FFMJ) توسط IGS منتشر شده است. مقایسه این نتایج با مقادیر منتشر شده توسط IGS در شکل(۷) نمایش داده شده است.

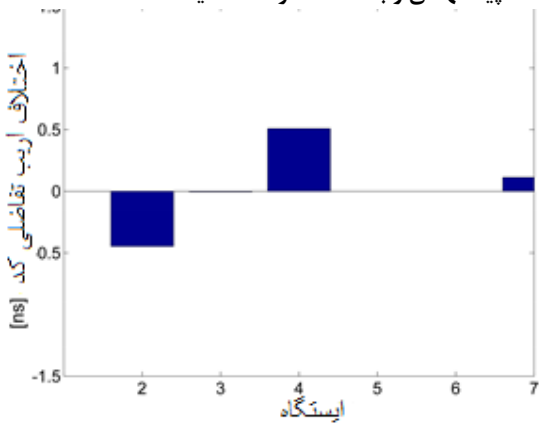


شکل ۵: شبکه تشکیل شده از ایستگاه‌های IGS و خط مبناهای این شبکه

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]

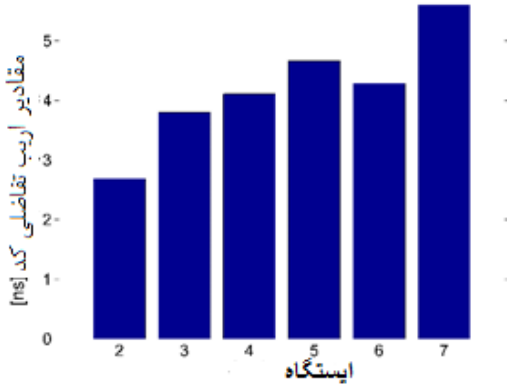


شکل ۶ : DCBهای برآورد شده ایستگاه‌های IGS با روش پیشنهادی و با استفاده از DCB ایستگاه FFMJ

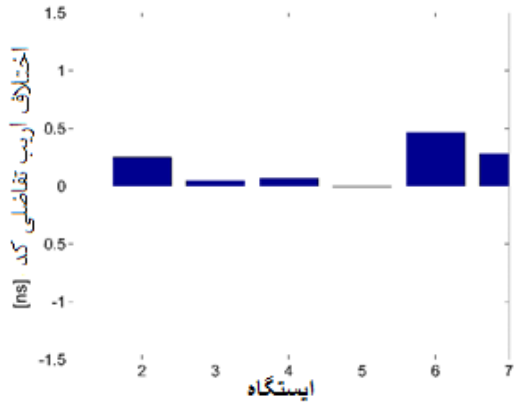


شکل ۷: اختلاف DCBهای برآورد شده با الگوریتم پیشنهادی و DCBهای ارائه‌شده توسط IGS

به‌دلیل عدم ارائه‌ی DCBهای مربوط به گیرنده های ایستگاه های ۵ و۶ توسط IGS (ایستگاه‌های TIT2 و WARN)، مقایسه نتایج الگوریتم و مقادیر IGS در این دو ایستگاه امکان‌پذیر نبود. برای غلبه بر این مشکل، از مقادیر DCB که توسط مرکز محاسباتی سازمان منابع طبیعی کانادا(NRCAN)[1] برای این نقاط محاسبه شده بود، جهت مقایسه استفاده گردید که نتایج آن را در شکل‌های (۸و ۹) آورده شده است.



شکل ۸: DCBهای برآورد شده ایستگاه‌های IGS با الگوریتم پیشنهادی

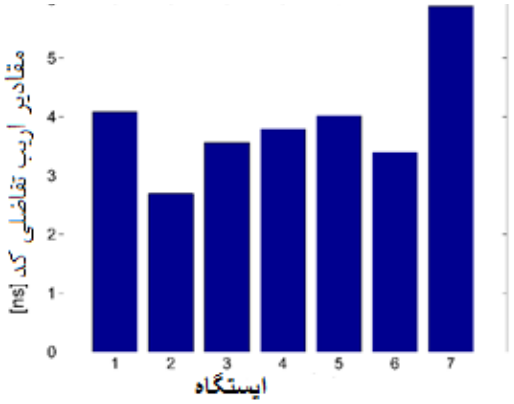


شکل ۹: اختلاف DCBهای برآورد شده با الگوریتم پیشنهادی و DCBهای ارائه‌شده توسط NRCAN

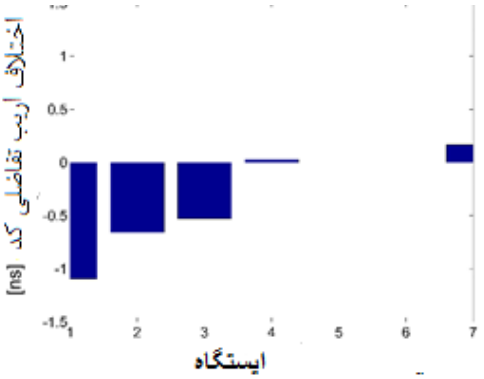
به‌منظور نشان دادن کارآیی الگوریتم این مقاله نسبت به روش معمول محاسبه DCB ماهواره‌ها و گیرنده‌های GNSS که همان برآورد مقادیر DCB ماهواره و گیرنده همزمان با ضرایب توابع پایه در فرآیند مدل‌سازی یونسفر می‌باشد، مدل‌سازی تک لایه یونسفر برحسب هامونیک‌های کروی در منطقه مورد نظر انجام شد و مقادیر DCB گیرنده‌های شبکه همزمان با ضرایب هامونیک برآورد گردید. نتایج حاصل و مقایسه آن با مقادیر منتشر شده توسط IGS و NRCAN در شکل‌های (۱۰، ۱۱ و ۱۲) نشان داده شده است. از مقایسه‌ی اشکال (۱۱,۹,۷و۱۲) ملاحظه می‌شود که مقادیر DCB برآورد شده با روش این مقاله انطباق بهتری با مقادیر DCB منتشر شده توسط IGS و NRCAN دارد.

[1] Natural Resources Canada: NRCAN

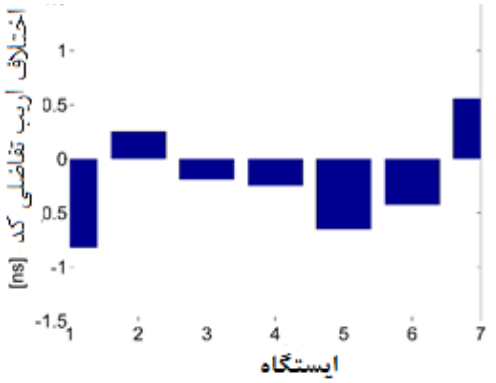
[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]



شکل ۱۰: DCBهای برآورد شده ایستگاه‌های IGS همزمان با مدل‌سازی یونسفر



شکل ۱۱: اختلاف DCBهای برآورد شده همزمان با مدل‌سازی یونسفر و DCBهای ارائه‌شده توسط IGS

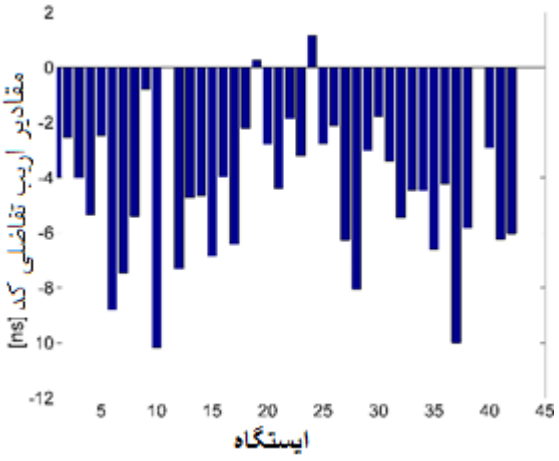


شکل ۱۲: اختلاف DCBهای برآورد شده همزمان با مدل‌سازی یونسفر و DCBهای ارائه‌شده توسط NRCAN

بعد از ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و اطمینان از صحت نتایج آن، مقادیر DCB گیرنده های IPGN با استفاده از این الگوریتم محاسبه گردید. شکل (۱۳) نحوه‌ی توزیع ایستگاه‌های IPGN را نمایش می‌دهد. در محاسبه DCB گیرنده های IPGN از مقدار معلوم DCB گیرنده ایستگاه تهران که جزء شبکه IGS بوده و مقدار آن منتشر می‌شود، استفاده گردید. در این محاسبات از داده‌های ۲۰۰۷/۰۱/۳۰ شبکه IPGN استفاده گردید. در شکل (۱۴) مقادیر اریب تفاضلی کد برآورد شده برای گیرنده‌های شبکه IPGN ملاحظه می‌گردد.

شکل ۱۳: نقشه پراکندگی ایستگاه‌های IPGN [۸]

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]



شکل ۱۴: DCB های برآورد شده ایستگاه‌های IPGN

۴- نتیجه‌گیری

تعیین کمیت DCB گیرنده‌های GPS در شبکه‌های منطقه‌ای و محلی به صورت مستقل از مدل‌سازی یونسفر، دارای کاربردهای بسیاری می‌باشد. در این مقاله، DCB گیرنده‌های IPGN به روشی جدید و مستقل از مدل‌سازی منطقه‌ای یونسفر محاسبه شده است. ایده‌ی این روش بر مبنای استفاده از تغییرات فاصله هندسی بین ماهواره‌ها و گیرنده‌های GPS استوار است. بدین منظور از مشاهدات تفاضلی یگانه بین دو گیرنده و یک ماهواره استفاده می‌گردد. در این روش اختلاف TEC بین مشاهدات تفاضلی یگانه به صورت تابعی خطی از اختلاف فاصله بین دو گیرنده و ماهواره در نظر گرفته می‌شود. سپس سری زمانی تغییرات فاصله بین دو گیرنده و ماهواره بررسی و در زمانی که اختلاف این دو فاصله صفر می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که اثر اختلاف TEC مربوط به دو ایستگاه در معادلات تقریباً ناچیز بوده و این اختلاف از معادلات حذف می‌گردند. بنابراین اختلاف باقیمانده در معادلات، مربوط به اختلاف DCB دو گیرنده خواهد بود. مقادیر DCB گیرنده های شبکه‌ای متشکل از ایستگاه‌های IGS به دو روش برآورد DCB ماهواره و گیرنده همزمان با ضرایب توابع پایه در فرآیند مدل‌سازی یونسفر و روش استفاده از تغییرات فاصله هندسی بین ماهواره‌ها و گیرنده‌های GPS محاسبه گردید. مقایسه‌ی مقادیر DCB حاصل از این دو روش با مقادیر منتشر شده توسط IGS، نشان دهنده‌ی انطباق بهتر نتایج روش این مقاله با مقادیر DCB منتشر شده توسط IGS می‌باشد. بعد از ارزیابی روش پیشنهادی مقاله و اطمینان از صحت نتایج آن، مقادیر DCB گیرنده های IPGN با استفاده از این روش محاسبه گردید.

مراجع

[1] M. A. Sharifi and S. Farzaneh, "Regional TEC dynamic modeling based on Slepian functions," Advances in Space Research, vol. 56, no. 5, pp. 907-915, 2015/09/01/ 2015.

[2] M. A. Sharifi and S. Farzaneh, "The spatio-spectral localization approach to modeling VTEC over the western part of the USA using GPS observations," Advances in Space Research, vol. 54, no. 6, pp. 908-916, 2014/09/15/ 2014.

[3] Y. Amerian, B. Voosoghi, and M. M. Hossainali, "Regional ionosphere modeling in support of IRI and wavelet using GPS observations," Acta Geophysica, journal article vol. 61, no. 5, pp. 1246-1261, October 01 2013.

[4] D. Bilitza and B. W. Reinisch, "International reference ionosphere 2007: improvements and new parameters," Advances in Space Research, vol. 42, no. 4, pp. 599-609, 2008.

[5] ر. محمود, س. علیرضا امیری, ع. جمال, ن. وهاب حاصله TEC ک. سینا, "آنالیز سری های زمانی and علوم و فنون نقشه GIM," از نقشه های عددی برداری, vol. سال چهارم, no. 3, pp. 213-224, 1393.

[6] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle. (2008). GNSS--global

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]

navigation satellite systems : GPS, GLONASS, Galileo, and more. Available: http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=769955

[7] G. Seeber. (2003). Satellite geodesy. Available: http://site.ebrary.com/id/10317965

[8] Available: http://gnss.be/ionosphere_tutorial.php

[9] F. Arikan, H. Nayir, U. Sezen, and O. Arikan, "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC," Radio Science, vol. 43, no. 4, pp. n/a-n/a, 2008.

[10] S. Jin, J.-H. Cho, and J.-U. Park, "Ionospheric slab thickness and its seasonal variations observed by GPS," Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 69, no. 15, pp. 1864-1870, 2007.

[11] E. Sardón, A. Rius, and N. Zarraoa, "Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations," Radio Science, vol. 29, no. 03, pp. 577-586, 1994.

[12] S. Schaer, "Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System," Geod.-Geophys. Arb. Schweiz, Vol. 59, vol. 59, 1999.

[13] R. Jin, S. Jin, and G. Feng, "M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases," GPS Solutions, journal article vol. 16, no. 4, pp. 541-548, 2012.

[14] S. Jin, O. F. Luo, and P. Park, "GPS observations of the ionospheric F2-layer behavior during the 20th November 2003 geomagnetic storm over South Korea," Journal of Geodesy, journal article vol. 82, no. 12, pp. 883-892, 2008.

[15] G. Ma and T. Maruyama, "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan," Ann. Geophys., vol. 21, no. 10, pp. 2083-2093, 2003.

[16] Y. Otsuka, T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, "A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan," Earth, Planets and Space, journal article vol. 54, no. 1, pp. 63-70, 2002.

[17] A. Komjathy, "Global ionospheric total electron content mapping using the Global Positioning System," University of New Brunswick, 1997.

[18] C.-K. Hong, D. A. Grejner-Brzezinska, and J. H. Kwon, "Efficient GPS receiver DCB estimation for ionosphere modeling using satellite-receiver geometry changes," Earth, Planets and Space, journal article vol. 60, no. 11, pp. e25-e28, 2008.

[19] X. F. Ma, T. Maruyama, G. Ma, and T. Takeda, "Determination of GPS receiver differential biases by neural network parameter estimation method," Radio Science, vol. 40, no. 1, pp. n/a-n/a, 2005.

[20] S. Farzaneh and M. A. Sharifi, "The regional estimates of the GPS satellite and receiver differential code biases," Iranian Journal of Geophysics, vol. 10, no. 5, pp. 31-41, 2017.

[21] M. Keshin, "A new algorithm for single receiver DCB estimation using IGS TEC maps," GPS Solutions, journal article vol. 16, no. 3, pp. 283-292, July 01 2012.

[22] G. Wautelet, S. Loyer, F. Mercier, and F. Perosanz, "Computation of GPS P1–P2 Differential Code Biases with JASON-2," GPS Solutions, journal article May 19 2017.

[23] O. Montenbruck, A. Hauschild, and P. Steigenberger, "Differential Code Bias Estimation using Multi - GNSS Observations and Global Ionosphere Maps," Navigation, vol. 61, no. 3, pp. 191-201, 2014.

[24] L. Ciraolo, F. Azpilicueta, C. Brunini, A. Meza, and S. M. Radicella, "Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS," (in English), J Geod Journal of Geodesy : Continuation of Bulletin Géodésique and manuscripta geodaetica, vol. 81, no. 2, pp. 111-120, 2007.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.6, No.1, Spring 2018

Iranian Permanent GPS Network Receivers Differential Code Biases Determination using Single Difference Observation Geometry Changes

Parviz Nematipour[1], Mehdi Raoofian Naeeni[2*], Yazdan Amerian[3]

1- Msc student, Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., Department of Geodesy, K. N. Toosi University of Technology
2- Assistant Prof. Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., Department of Geodesy, K. N. Toosi University of Technology
3- Assistant Prof. Faculty of Geodesy and Geomatics Eng., Department of Geodesy, K. N. Toosi University of Technology

Abstract

Differential Code Bias (DCB) of GPS satellites and receivers are one of the most important error sources in a positioning and ionosphere modeling using GPS code observations. International GNSS Services (IGS) compute and publishes the DCBs of GNSS satellites and its nework GNSS receivers as an ionosphere single layer model byproduct. Determination of Iranian Permanent GPS Network (IPGN) receivers DCBs independent of ionosphere single layer modeling is the aim of this paper. This method uses single difference observation geometry changes. Total electron content (TEC) differences of single difference observations can be considered as a linear function of its observation differences. When the distance between to receivers and satellite are equal, the effect of TEC will be removed from single difference observation and just the effect of different DCBs of two receivers will be remained in a single difference observation. The proposed method is implemented on a network which includes some IGS GNSS stations and derived DCBs are compared with IGS published DCBs for those stations. The maximum difference is 0.6 nanosecond and the RMSE of the differences is 0.4 nanosecond. This comparision shows the high efficiency of proposed method for determination of GPS receivers DCBs. Then IPGN GPS receivers DCBs are computed which can be published as a product for users.

Key words: Differential Code Bias, Single Difference Observation, Total Electron Content

Correspondence Address Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Vali_Asr St., Mirdamad Cross, Tehran, Iran.
Tel : +989382862837
Email: mraoofian@kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.29252/jgit.6.1.45]