

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

پرویز نعمتی پور^۱، مهدی رووفیان نائینی^{۲*}، یزدان عامریان^۳

- ۱ دانشجوی کارشناسی ارشد زئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
-۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
-۳ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین 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 مدل سازی محتوی الکترونی کلی (TEC) یونسfer 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 مدل سازی جهانی یونسfer، محاسبه و منتشر می‌کند. تعیین کمیت DCB گیرنده‌های GPS در شبکه‌های منطقه‌ای و محلی به صورت مستقل از مدل سازی یونسfer، دارای کاربردهای بسیاری می‌باشد. در این مقاله، DCB گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران (IPGN) به روشی جدید و مستقل از مدل سازی منطقه‌ای یونسfer محاسبه شده است. ایده‌ای، 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 می‌گردد. 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 مرکز مختلف محاسباتی و همکار IGS مقایسه گردید. حداکثر اختلاف بین DCB برآورد شده و DCB منتشره توسط IGS کمتر از 6×10^{-14} نانوثانیه و مربع خطای باقیمانده (RMSE) برای 4×10^{-14} نانوثانیه می‌باشد که حاکی از کارآبی 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 به عنوان یک محصول موردن 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 زئودزی و زئوماتیک

تلفن: ۰۹۳۸۲۸۶۲۸۳۷

۱- مقدمه

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 به منظور تخمین این کمیت به صورت تابعی از مکان و زمان ارائه شده‌اند^[۱, ۲, ۳] و ^[۵]. این مدل‌ها به صورت‌های جهانی و محلی ارائه شده و بر مبنای مشاهدات مستقیم چگالی الکترونی به کمک یونوسوند یا از طریق مشاهدات سیستم‌های ناوبری جهانی به دست می‌آیند.

یکی از مهمترین سیستم‌های ناوبری جهانی، سیستم تعیین موقعیت جهانی^۳ (GPS) است. این سیستم متشکل از ۲۲ 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 ارائه مدل‌های محل یونسفری و همچنین بهبود نتایج مدل‌های جهانی داشته است [۴, ۷].

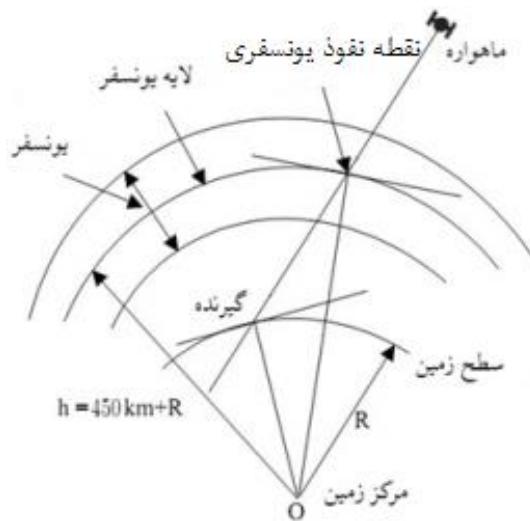
در مطالعه‌ی یونسفر به کمک مشاهدات GPS، کمیتی تحت عنوان محتوی الکترونی کلی^۴ (TEC)^۵ تعریف می‌گردد. این کمیت برابر مجموع الکترون‌های آزاد از ماهواره تا گیرنده در یک سطح مقطع یک متر مربعی بوده و موجب تأخیر در مشاهدات کد و تقدیم در مشاهدات فاز GPS می‌گردد. به کمک مشاهدات حاصل از گیرنده‌های دو فرکانسی می‌توان این اثر را از مشاهدات حذف نمود. از طرف دیگر، مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسی این امکان را فراهم نموده‌اند که بتوانیم مقدار TEC را در نقاطی موسوم به نقاط نفوذ یونسفری^۶ (IPP) محاسبه نماییم (شکل (۱)).

در دهه‌های اخیر سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی^۱ (GNSS) به طور گسترده به منظور مطالعه و پایش جو زمین مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سیستم‌ها با هدف تعیین موقعیت نقاط زمینی در یک سیستم زمین مرتع 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. به منظور 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، برآورده دقیق این اثرات امکان‌پذیر شده است. با محاسبه‌ی اثرات جو بر انتشار سیگنال‌های مربوطه، علاوه بر افزایش دقت تعیین موقعیت، می‌توان از این اثرات به عنوان 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^۷ می‌باشد، در نتیجه امواج الکترومغناطیسی هنگام عبور از این لایه دچار تأخیر و تقدم خواهد 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

³ GPS⁴ Total Electron Content: TEC⁵ Ionospheric Pierce Point: IPP¹ Global Navigation Satellite System: GNSS² Dispersive

مدل‌سازی یونسfer با استفاده از روش کمترین مربعات برآورد می‌گردد [۱۴ و ۱۵]. در این روش، از ضخامت یونسfer صرف نظر شده و الکترون‌های آزاد این لایه بر روی یک پوسته کروی در یک ارتفاع ثابت متراکم فرض می‌گردد. سپس TEC در امتداد مسیر گذر امواج GPS به وسیله تابع تصویر به TEC در امتداد زنیت تبدیل می‌شود [۱۶، ۱۷ و ۹، ۱۱، ۱۲]. در نتیجه، محاسبه DCB در این روش به مدل‌سازی یونسfer وابسته بوده و محاسبه این مقادیر به صورت مستقل امکان پذیر نمی‌باشد [۱۸]. اریکان و همکاران DCB با استفاده از الگوریتم IONOLAB-BIAS تک ایستگاه را با استفاده از مقادیر TEC محاسبه نمودند که اختلاف روش ارائه شده در مقایسه با DCB 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 ایستگاه‌های 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 ۱۰/۳۰ نانوثانیه بود [۲۱]. وتلت و همکاران با استفاده از مشاهدات ماهواره ارتفاع سنجی، DCB، گیرنده و ماهواره‌های GPS برآورد نمودند که نتایج در مورد ماهواره‌های GPS در مقایسه با مقادیر منتشره توسط IGS مطابقت بهتری نسبت به گیرنده‌های GPS داشت [۲۲]. مانتن برآک و همکاران با استفاده از مشاهدات گیرنده‌های GNSS و نقشه‌های جهانی یونسfer به محاسبه DCB پرداخته‌اند [۲۳]. روش‌های ارائه شده فوق به منظور محاسبه DCB، نیازمند محاسبه و مدل‌سازی TEC نیز می‌باشد و به طور مستقل مقادیر DCB را ارائه نمی‌دهند.



شکل ۱: نمایی از یونسfer و نقطه نفوذ یونسferی [۸]

پارامتر و خطاهای وابسته به هندسه، نظریه فاصله هندسی بین ماهواره و گیرنده، تأخیر ترپوسفری، خطای ساعت ماهواره و گیرنده را می‌توان به کمک ترکیب خاصی از مشاهدات GPS تحت عنوان ترکیب مستقل از هندسه^۱ حذف نموده و از این ترکیب جهت برآورد TEC استفاده کرد [۹ و ۱۰]. تأخیر یونسferی، اریب تفاضلی کد (DCB)^۲ 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 می‌تواند 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 یونسfer با استفاده از داده‌های GPS می‌باشد. DCB در فرآیند مدل‌سازی یونسfer فرض می‌شود که ماهواره و گیرنده به ترتیب دارای ثبات ماهانه و چند روزه می‌باشند [۱۱ و ۱۲]. در حالی که در واقعیت این مقادیر دارای تغییرات روزانه می‌باشند [۱۳]. معمولاً مقادیر DCB ماهواره و گیرنده، طی فرآیند

¹ Geometry Free² Differential Code Biase: DCB

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 گیرنده‌ها 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 شبکه فاصله کد^۳ و فاز موج حامل^۴ می‌پردازیم. معادلات مشاهدات کد و فاز موج حامل به ترتیب به صورت رابطه‌های (۱) و (۲) است [۱۴]:

در این رابطه‌ها P شبکه‌فاصله‌ی اندازه گیری شده، L مشاهده فاز موج حامل، ρ فاصله هندسی بین ماهواره و گیرنده، d_{trop} خطای تروپوسفر، d_{ion} خطای یونسفر و گیرنده، d_r اریب وابسته به فرکانس ماهواره و گیرنده، d^s سرعت نور در خلا، N ابهام فاز موج حامل و C نویز اندازه گیری‌ها می‌باشد. همچنین اندیس s به فرکانس موج حامل، اندیس $k = \{1, 2\}$ به گیرنده اشاره دارد. با استفاده از مشاهدات در دو فرکانس $f_{L_1} = 1575.42 MHz$ و $f_{L_2} = 2.2 MHz$ تأخیر یونسفری را می‌توان از ترکیب خطی مستقل از هندسه کد (P4) و همچنین ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز (L4) به صورت رابطه (۳) محاسبه نمود:

سرвис بین‌المللی GNSS^۱ (IGS) به صورت روزانه DCB‌های مربوط به ماهواره‌های GNSS و بیشتر ایستگاه‌های IGS را در قالب مدل‌سازی جهانی یونسفر محاسبه و منتشر می‌کند اما با این وجود دو مسئله 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.

به منظور حل مسائل فوق در این مقاله از یک روش مستقل از مدل‌سازی یونسفر به منظور تعیین GPS-DCB‌های گیرنده‌های شبکه دائم GPS ایران (IPGN)^۲ 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 می‌گردد. بنابراین اختلاف باقیمانده در معادلات، مربوط به اختلاف DCB دو گیرنده خواهد بود و با معلوم بودن مقدار DCB یکی از گیرنده‌های شبکه، مقدار DCB سایر گیرنده‌ها به دست خواهد آمد. به منظور 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.

³Code Pseudorange Observations

⁴Carrier Phase Observations

¹ International GNSS Service: IGS

² Iranian Permanent GPS Network: IPGN

$$P_{k,r}^s = \rho_{0,r}^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + d_{trop,r}^s + d_{ion,k,r}^s + d_k^s + d_{k,r}^s + \varepsilon_{P,k,r}^s \quad (1)$$

$$L_{k,r}^s = \rho_{0,r}^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + d_{trop,r}^s - d_{ion,k,r}^s - \lambda(b_{k,r}^s + N_{k,r}^s) + \varepsilon_{L,k,r}^s \quad (2)$$

$$P_4 = P_{\frac{1}{2}}^s - P^s = (d_{ion,1,r}^s - d_{ion,2,r}^s) + DCB^s + DCB_r \quad (3)$$

$$L_4 = L_{1,r}^s - L_{2,r}^s = -(d_{ion,1,r}^s - d_{ion,2,r}^s) - \lambda(b_{1,r}^s + b_{2,r}^s) - \lambda(N_{1,r}^s + N_{2,r}^s) \quad (4)$$

دارند. با توجه به اینکه اثر یونسfer در مشاهدات کد باعث تأخیر و در مشاهدات فاز باعث تقدم می‌گردد، لذا از جمع دو رابطه فوق خواهیم داشت (رابطه (۵)):

$$P_{4,r}^s + L_{4,r}^s = DCB^s + DCB_r - \lambda(b_{1,r}^s + b_{2,r}^s) - \lambda(N_{1,r}^s + N_{2,r}^s) \quad (5)$$

پس لازم است که اپک وقوع جهش فاز مشخص گردد تا فرایند نرم نمودن مشاهدات یونسferی کد برای قبل و بعد از این اپک به صورت 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 به منظور کشف جهش فاز استفاده شد [۶].

درنهایت با ترکیب دو رابطه اخیر، به رابطه زیر که در آن I_r^s تأخیر یونسferی می‌باشد، می‌رسیم:

$$P_{4,r}^s = F.I_r^s + DCB^s + DCB_r$$

$$F = 1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}$$

رابطه (۷)

مشاهده کد تفاضلی یگانه‌ی نرم شده با مشاهده فاز^۳، از مشاهده همزمان از دو گیرنده^۴ و زبه ماهواره تشکیل می‌شود. در نتیجه خطاهای وابسته به ماهواره حذف می‌شوند [۱۸]. بنابراین برای مشاهده‌ی تفاضلی خواهیم داشت

رابطه (۸)

$$P_{4,ij}^s = F.I_{ij}^s + \Delta b_{ij}$$

$$\Delta b_{ij} = DCB_i - DCB_j$$

$$I_{ij}^s = I_i^s - I_j^s$$

³ Single-Difference Geometry-Free Phase-Smoothed P-code: SD-GSC

در روابط $DCB^s = d_1^s - d_2^s$ 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 تأخیر سخت افزاری ماهواره و گیرنده می‌باشند، اشاره

به دلیل بالا بودن نویز مشاهدات کد و وجود ابهام فاز در مشاهدات فاز امکان استفاده مستقل از هر یک از این مشاهدات در محاسبه مشاهده‌ی مشاهداتی 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 پیوسته مشاهداتی نامیده می‌شود را در نظر گرفته و مشاهده $\Phi_{4,r}^s$ (ترکیب خطی مستقل از هندسه فاز) هر اپک^۱ از میانگین رابطه فوق کسر می‌شود (رابطه (۶)):

$$P_{4,r}^s = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (P_{4,r}^s + \Phi_{4,r}^s)_j - \Phi_{4,r}^s \quad (6)$$

در این رابطه $P_{4,r}^s$ ترکیب خطی مستقل از هندسه کد نرم شده با مشاهده فاز^۲ برای ماهواره s و گیرنده r می‌باشد.

فرایند نرم نمودن مشاهدات یونسferی کد با استفاده از مشاهدات یونسferی 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.

¹Epoch

²Phase-Smoothed P-Code

متغیر است و از آنجا که تأخیر یونسferی وابسته به مدت زمان سیر سیگنال در لایه یونسfer است، لذا با تقریب بسیار خوبی می‌توان فرض کرد که اگر مدت زمان سیر سیگنال تا دو گیرنده برابر باشد، تأخیر یونسferی نیز در این دو مسیر برابر خواهد بود. یعنی با در نظر گرفتن رابطه^(۹)، اگر در یک اپک زمانی مشخص مقدار $R_{ij}^s = 0$ باشد، آنگاه مقدار $I_{ij}^s = 0$ است و مقدار $P_{4,ij}^s$ در این حالت ناشی از اختلاف اریب تفاضلی کد دو گیرنده خواهد بود [۱۸]. به عنوان مثال در شکل ۲ در اپک t_2 تأخیر یونسferی تفاضلی یگانه صفر می‌باشد.

قدم اول در محاسبه DCB گیرنده با روش مطرح شده در این مقاله تشکیل خطوط مبنا^۳ شبکه GPS می‌باشد. در مرحله بعد بازه پیوسته‌ای از مشاهدات SD-GSC برای هر خط مبنا به گونه‌ای 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 از 70° باشد.

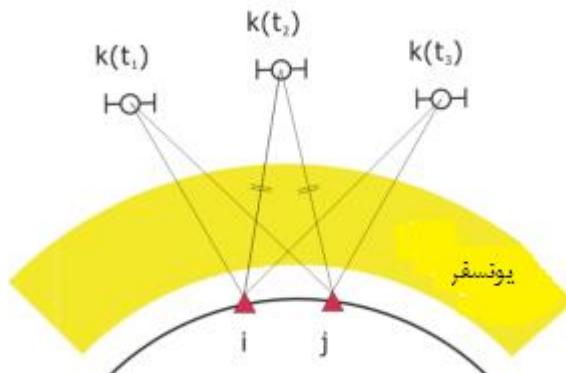
شکل (۳) یک بازه پیوسته از مشاهدات SD-GSC برای ماهواره‌ی شماره ۶ و دو ایستگاه FFMJ و HUEG از شبکه جهانی IGS و شکل (۴) تغییرات فاصله تفاضلی یگانه مربوط به شکل (۳) را نشان می‌دهد.

^۵ که در آن $P_{4,ij}^s$ مشاهده تفاضلی یگانه خطی مستقل از هندسه کد نرم شده با مشاهده فاز و I_{ij}^s تأخیر یونسferی تفاضلی یگانه^۱ می‌باشد.

ایده اصلی این روش جهت محاسبه DCB بر این اصل استوار است که تأخیر یونسferی تفاضلی یگانه در مشاهدات SD-GSC (معادلات^(۸)) تنها وابسته به فاصله تفاضلی یگانه^۲ بین دو گیرنده و ماهواره می‌باشد که این وابستگی با معادله خطی به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۸]:

$$I_{ij}^s(t) = \alpha R_{ij}^s(t) + \beta \quad (۹)$$

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



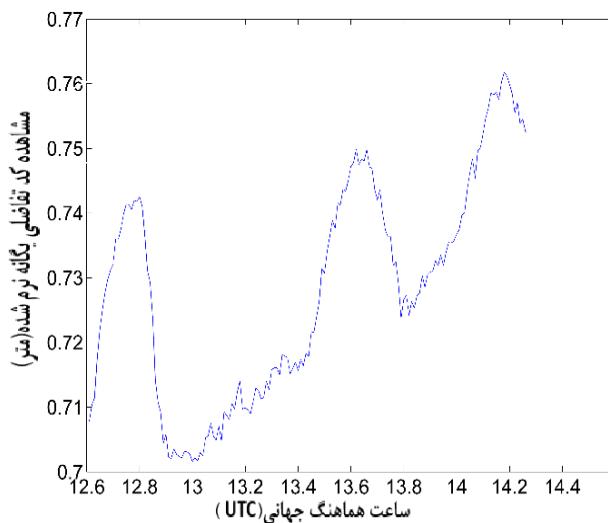
شکل ۲: تغییرات فاصله هندسی تفاضلی یگانه نسبت به زمان‌های (t_1, t_2, t_3) [۱۸]

با توجه به شکل (۲)، ملاحظه می‌شود که فاصله هندسی بین ماهواره و دو گیرنده در حالت تفاضلی یگانه

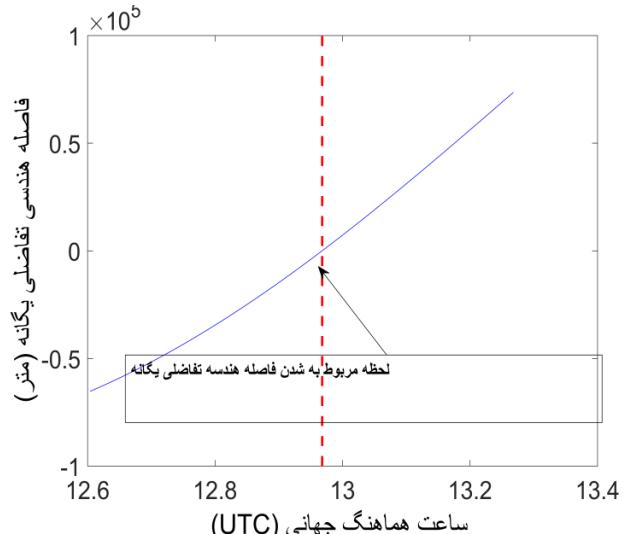
¹SD Ionospheric Delay

² Single-Difference Geometric Ranges: SD-GR

³ BaseLines



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)

فاصله تفاضلی یگانه صفر شود، در این صورت در این اپک خاص مقدار I_{ij}^s صفر خواهد شد لذا می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} I_{ij}^s(t_0) = 0, \\ R_{ij}^s(t_0) = 0 \end{cases} \Rightarrow \beta = 0 \quad (11)$$

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

$$(12)$$

$$E\{P_{ij}^s(t)\} = [F \cdot R_{ij}^s(t) \quad 1] \begin{bmatrix} \alpha \\ \Delta b_{ij} \end{bmatrix}$$

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:

$$(10)$$

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

که در این رابطه E اپراتور امید ریاضی می‌باشد. اگر در یک اپک خاص از کمان پیوسته مشاهداتی،

مورد استفاده قرار گیرد [۱۸]. به منظور 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 مبنای 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.

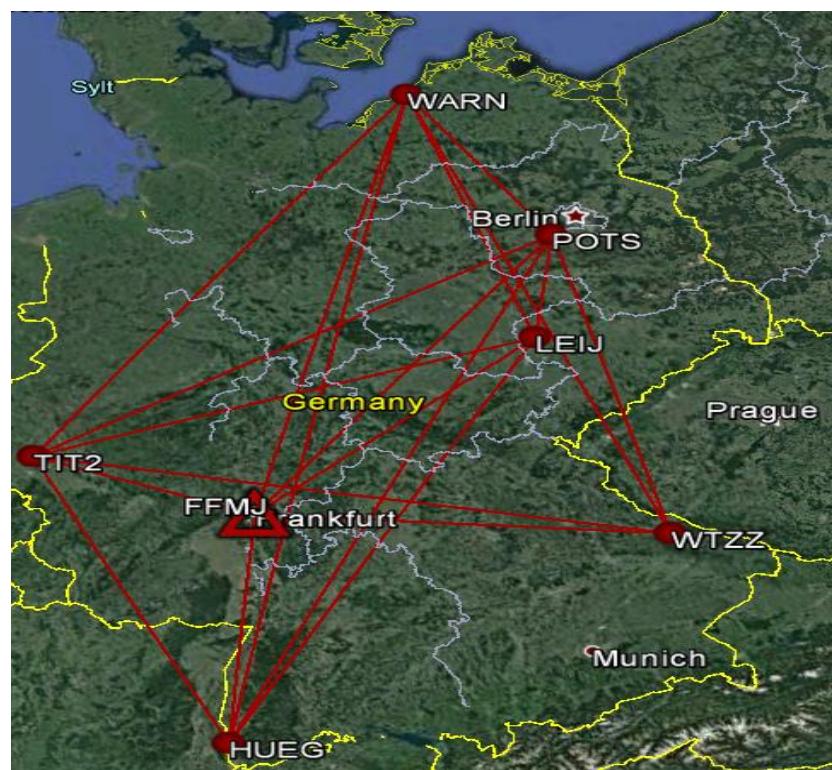
که مقادیر Δb_{ij} و α باید برآورده شوند. باید این نکته مورد توجه قرار گیرد که رابطه (۱۲) در صورتی برقرار است که اپک خاصی مثل t_0 در بازه پیوسته مشاهداتی وجود داشته باشد. بعد از محاسبه Δb_{ij} مربوط به شبکه GPS، با معلوم بودن حداقل یکی از ایستگاه‌های شبکه، با استفاده از روش کمترین مربعات، DCB سایر ایستگاه‌ها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

$$E\left\{\begin{bmatrix}\overline{\Delta b_{ij}} \\ \overline{\Delta b_i}\end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix}1 & -1 \\ 1 & 0\end{bmatrix} \begin{bmatrix}\Delta b_i \\ \Delta b_j\end{bmatrix} \quad (13)$$

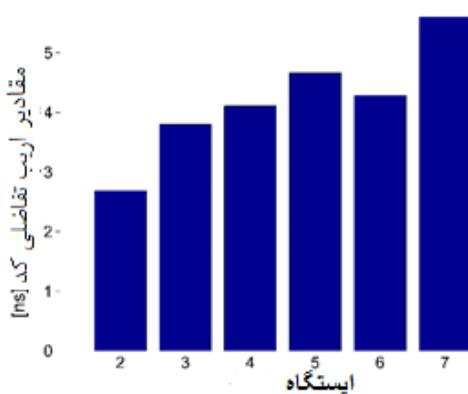
که در آن $\overline{\Delta b_{ij}}$ ، $\overline{\Delta b_i}$ تفاضلی یگانه شبکه، $\overline{\Delta b_i}$ معلوم ایستگاه i و $\overline{\Delta b_j}$ مجھول ایستگاه j می‌باشد.

۳- نتایج عددی

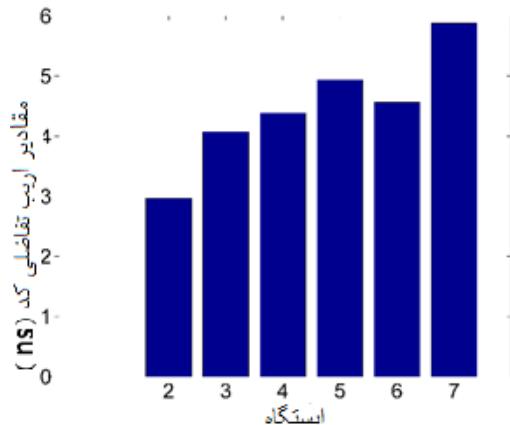
روش پیشنهادی می‌تواند برای محاسبه DCB گیرنده‌ها، در یک شبکه محلی‌های و جهانی GNSS



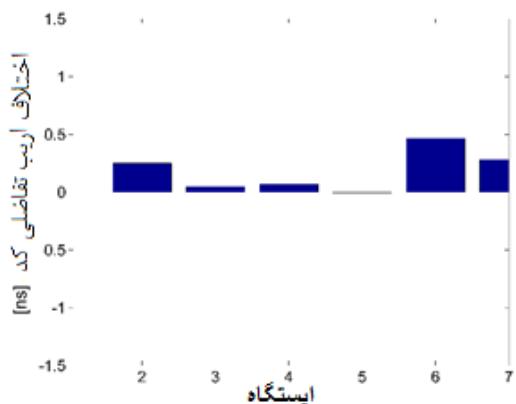
شکل ۵: شبکه تشکیل شده از ایستگاه‌های IGS و خط مبنای این شبکه



شکل ۸: DCB‌های برآورد شده ایستگاه‌های IGS با الگوریتم پیشنهادی

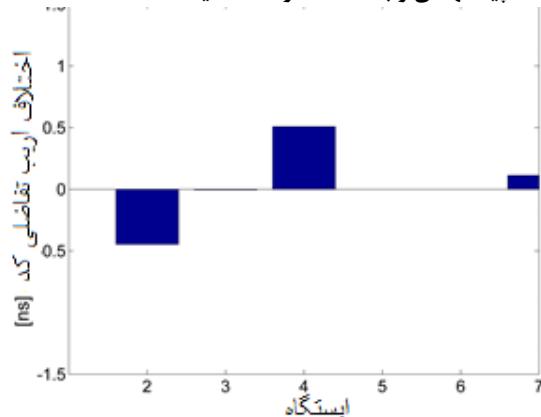


شکل ۶: DCB‌های برآورد شده ایستگاه‌های IGS با روش پیشنهادی و با استفاده از DCB ایستگاه FFMJ



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

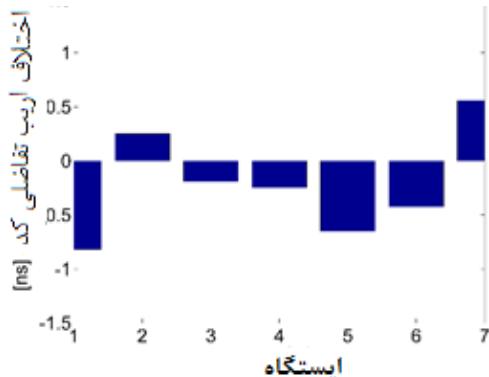
به منظور نشان دادن کارآیی الگوریتم این مقاله نسبت به روش معمول محاسبه DCB ماهواره‌ها و گیرنده‌های GNSS که همان برآورد مقادیر DCB ماهواره و گیرنده همزمان با ضرایب توابع پایه در فرآیند مدل سازی یونسfer می‌باشد، مدل سازی تک لایه یونسfer بر حسب هامونیک‌های کروی در منطقه مورد نظر انجام شد و مقادیر DCB گیرنده‌های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



شکل ۷: اختلاف DCB‌های برآورد شده با IGS ارائه شده توسط DCB ایستگاه NRCAN

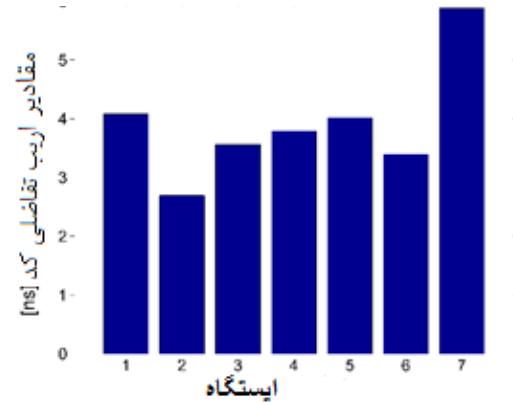
به دلیل عدم ارائه DCB‌های مربوط به گیرنده‌های ایستگاه‌های ۵ و ۶ توسط IGS (ایستگاه‌های WARN و TIT2)، مقایسه نتایج الگوریتم و مقادیر IGS در این دو ایستگاه امکان‌پذیر نبود. برای غلبه بر این مشکل، از مقادیر DCB که توسط مرکز محاسباتی سازمان منابع طبیعی کانادا (NRCAN)^۱ برای این نقاط محاسبه شده بود، جهت مقایسه استفاده گردید که نتایج آن را در شکل‌های (۹ و ۸) آورده شده است.

^۱ Natural Resources Canada: NRCAN

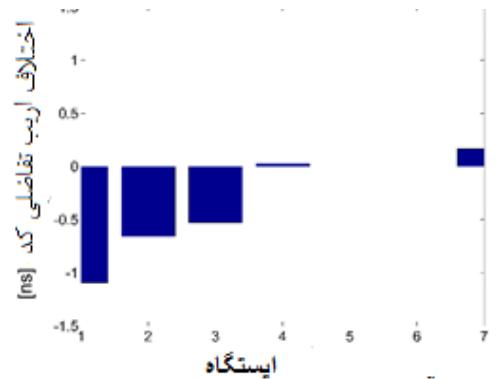


شکل ۱۲: اختلاف DCB های برآورد شده همزمان با مدل سازی یونسfer و DCB های ارائه شده توسط NRCAN

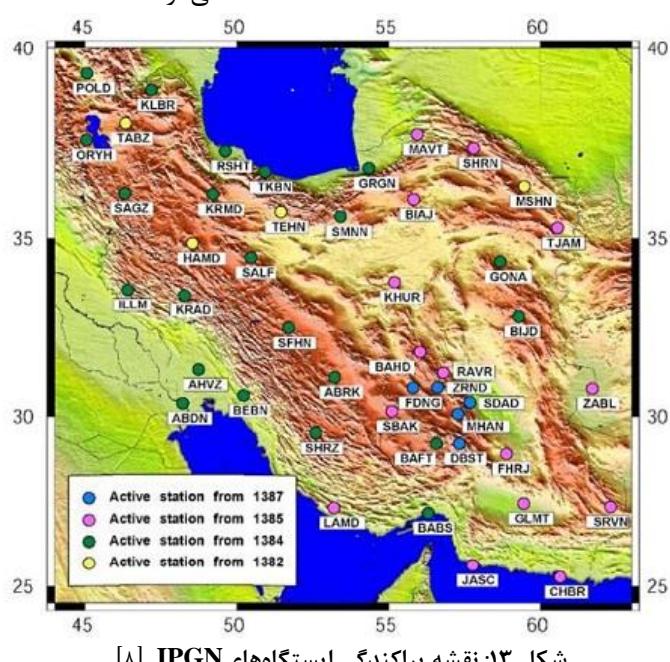
بعد از ارزیابی الگوریتم پیشنهادی و اطمینان از صحت نتایج آن، مقادیر DCB گیرنده های IPGN با استفاده از این الگوریتم محاسبه گردید. شکل (۱۳) نحوه توزیع ایستگاه های IPGN را نمایش می دهد. در محاسبه DCB گیرنده های IPGN از مقدار معلوم DCB گیرنده ایستگاه تهران که جزء شبکه IGS بوده و مقدار آن منتشر می شود، استفاده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



شکل ۱۰: DCB های برآورد شده ایستگاه های IGS همزمان با مدل سازی یونسfer

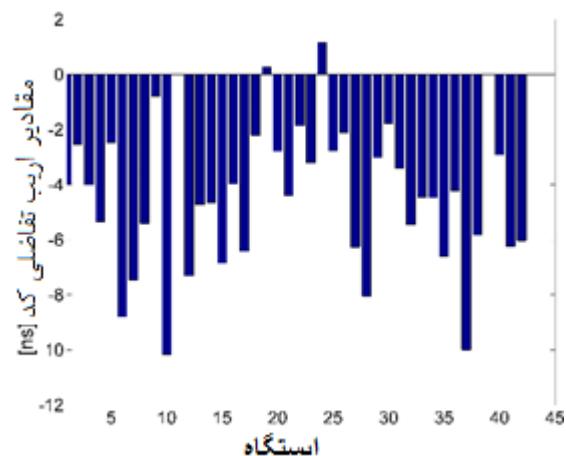


شکل ۱۱: اختلاف DCB های برآورد شده همزمان با IGS همزمان با مدل سازی یونسfer و DCB های ارائه شده توسط IPGN



شکل ۱۳: نقشه پراکندگی ایستگاه های IPGN [۸]

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 می‌گردد. بنابراین اختلاف باقیمانده در معادلات، مربوط به اختلاف DCB دو گیرنده خواهد بود. مقادیر DCB گیرنده‌های شبکه‌ای مت Shank از ایستگاه‌های IGS به دو روش برآورد DCB ماهواره و گیرنده همزمان با ضرایب توابع پایه در فرآیند مدل‌سازی یونسfer و روش استفاده از تغییرات فاصله هندسی بین ماهواره‌ها و گیرنده‌های GPS محاسبه گردید. مقایسه مقادیر DCB حاصل از این دو روش با مقادیر منتشر شده توسط IGS نشان دهنده 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 گیرنده‌های IPGN با استفاده از این روش محاسبه گردید.



شکل ۱۴: DCB های برآورد شده ایستگاه‌های IPGN

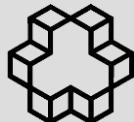
۴- نتیجه‌گیری

تعیین کمیت DCB گیرنده‌های GPS در شبکه‌های منطقه‌ای و محلی به صورت مستقل از مدل‌سازی یونسfer، دارای کاربردهای بسیاری می‌باشد. در این مقاله، DCB گیرنده‌های IPGN به روشی جدید و مستقل از مدل‌سازی منطقه‌ای یونسfer 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

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] د. محمود، س. علیرضا امیری، ع. جمال، ن. وهاب حاصله TEC ک. سینا، "آنالیز سری های زمانی and علوم و فنون نقشه های عددی از نقشه های GIM،" سال چهارم vol. 3, pp. 213-224, 1393.
- [6] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle. (2008). GNSS--global

- 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.



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

Parviz Nematipour¹, Mehdi Raoofian Naeeni^{2*}, Yazdan Amerian³

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