

حل سریع ابهام فاز به روش AFM در دریا

عبدالرضا صفری^{۱*}، یحیی جمور^۲ و میثم غنی‌زاده^۳

^۱استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

^۲استادیار آموزشکده نقشه‌برداری - سازمان نقشه‌برداری

^۳دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئودزی - هیدروگرافی گروه مهندسی نقشه‌برداری

پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۱/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۷/۴/۱۵، تاریخ تصویب ۸۷/۹/۱۲)

چکیده

امروزه استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)، برای اهداف دریایی رو به گسترش است. جهت اهداف تعیین موقعیت دقیق در دریا ناگزیر به حل سریع ابهام فاز هستیم. حل ابهام در دریا به دلیل تشدید پدیده جهش فاز با مشکلات زیادی همراه است. در میان روش‌های موجود به منظور تعیین ابهام فاز روش AFM به دلیل عدم تاثیر پذیری از پدیده جهش فاز و امکان افزودن قید ارتفاعی نسبت به سایر روش‌ها دارای ارجحیت می‌باشد. در این مقاله نشان داده شده است که حل سریع ابهام با AFM به خوبی قابل انجام بوده و تأیید این مطلب با نتایج عددی ذکر شده در انتهای مقاله نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: ابهام فاز، نوبری، سیستم تعیین موقعیت جهانی، روش تابع ابهام

مقدمه

ماهواره‌ها و گیرنده‌ها تشکیل می‌شوند. معروف‌ترین آنها به نام معادله تفاضلی دوگانه به صورت زیر است [۲].

$$\begin{aligned} \Delta \nabla \bar{\phi}_{ab}^{mn} = & \frac{1}{\lambda} (\Delta \nabla \mathbb{R}_{ab}^{mn} + \Delta \nabla d\mathbb{R}_{ab}^{mn} \\ & - \frac{\Delta \nabla I_{ab}^{mn}}{f^2} + \Delta \nabla T_{ab}^{mn} + \\ & \Delta \nabla M_{ab}^{mn} + \Delta \nabla v_{ab}^{mn} + \\ & \Delta \nabla \delta p_{svab}^{mn} - \Delta \nabla \delta p_{recab}^{mn}) \\ & + \Delta \nabla N_{ab}^{mn} \end{aligned} \quad (2)$$

اندیس های بالای m و n ، ماهواره مرجع (m) و ماهواره n ، اندیس های پایین a و b ، ایستگاه مرجع a و ایستگاه متحرک^۶ b هستند و \mathbb{R} ، $d\mathbb{R}$ ، T ، M ، I ، δ_{sv} ، δ_{rec} همان تعاریف معادله (۱) را دارند. مختصات (X, Y, Z) ایستگاه مجهول در $\Delta \nabla \mathbb{R}_{ab}^{xy}$ مستتر شده است. مشکلی که وجود دارد مجهول بودن همزمان مختصات ایستگاه مجهول و ابهام فاز است. مراحل حل مجهولات معادله فوق (مختصات ایستگاه مجهول و ابهام فاز هر ماهواره) در شکل (۱) آمده است [۳].

زمان‌بر بودن فرآیند حل ابهام فاز و نیاز به تعداد مشاهدات زیاد باعث عدم به کارگیری مشاهدات فاز حامل توسط بسیاری از کاربران در تعیین موقعیت آنی شده است. امروزه توجه محققان به سمت حل سریع ابهام و

امروزه استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی (GPS)، برای اهداف دریایی رو به گسترش است. جهت اهداف تعیین موقعیت دقیق در دریا ناگزیر به حل سریع ابهام فاز^۱ هستیم [۱]. دقیق‌ترین روش تعیین موقعیت با سیستم تعیین موقعیت جهانی^۲، استفاده از مشاهدات فاز حامل^۳ است.

مشاهده فاز حامل به صورت ذیل نوشته می‌شود [۲]:

$$\begin{aligned} \Phi = & \frac{1}{\lambda} (\mathbb{R} + d\mathbb{R} - \frac{I}{f^2} + T + M \\ & + c\delta t_{rec} - c\delta t_{sv} + v) + N \end{aligned} \quad (1)$$

که \mathbb{R} فاصله واقعی میان ماهواره و گیرنده (متر)، $d\mathbb{R}$ خطای مدار ماهواره، λ طول موج سیگنال‌های L_1 و L_2 و N عدد صحیح ابهام فاز (تعداد سیکل‌های کامل طی شده از ماهواره تا گیرنده)، I پارامتر تقدم یونسفر، f فرکانس سیگنال حامل (۱۵۷۵.۴۲ مگاهرتز برای L_1 و ۱۲۲۷.۶۰ مگاهرتز برای L_2)، T پارامتر تاخیر تروپوسفر (متر)، M اندازه تاخیر چندمسیری^۴ (متر)، c سرعت نور (متر بر ثانیه)، δt_{rec} خطای ساعت گیرنده، δt_{sv} خطای ساعت ماهواره و v مقدار نویز گیرنده است. به منظور حذف و یا کاهش خطاهای ساعت ماهواره، مدار ماهواره، یونسفر و تروپوسفر، مشاهدات تفاضلی^۵ با ترکیب مشاهدات فاز بین

GPS به علت انعکاس‌پذیری سطح آب بسیار رخ می‌دهد که موجب تداخل سیگنال‌ها و در نتیجه بروز جهش فاز می‌گردد (۲) بروز جهش فاز به علت نوسانی بودن سطح آب دریا و وارد آمدن شتاب‌های سریع به کشتی.

بیشتر روش‌های حل ابهام فاز با حل شناور ابهام^{۱۳} شروع می‌شوند و با تخمین ابهامات صحیح پایان می‌یابند که مبنای آنها حل کمترین مربعات است. حل کمترین مربعات در برابر پدیده جهش فاز آسیب‌پذیر بوده و دچار واگرایی در سرشکنی می‌شود. از این رو با بررسی روش‌های موجود حل ابهام فاز، روش تابع ابهام به عنوان روش مناسب جهت حل ابهام فاز برگزیده شد.

علیرغم عدم تأثیری‌پذیری روش تابع ابهام^{۱۴} از پدیده جهش فاز مشکل اصلی این روش بالا بودن زمان محاسبات می‌باشد. علت این مسئله نیز بزرگ بودن فضای جستجو و فاصله نقاط شبکه جستجو می‌باشد. چون در دریا تغییرات ارتفاعی کوچک می‌باشد لذا می‌توان برای کوچک نمودن فضای جستجو، این قید را اضافه کرد. که البته این نیز یکی دیگر از ویژگی‌های مثبت این روش است که اجازه می‌دهد که قید ارتفاعی را اضافه کرد.

در ادامه این مقاله ابتدا در بخش دوم و سوم به تعریف ویژگی‌های روش AFM پرداخته و در بخش چهارم نیز بمنظور بررسی تأثیر فاصله شبکه نقاط جستجو بر سرعت حل ابهام یک آزمایش عددی انجام گرفته است.

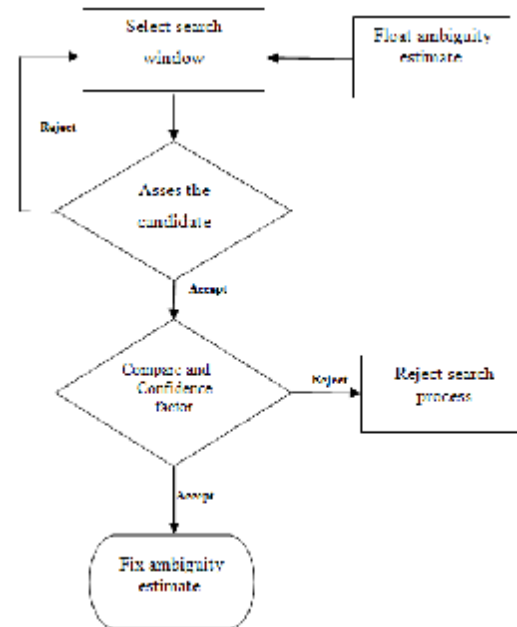
حل ابهام فاز با تابع ابهام

روش تابع ابهام یا AFM برای رسیدن به یک مجموعه از اعداد صحیح ابهام به کار می‌رود و می‌توان در چهار مرحله به صورت زیر آن را بیان کرد:

- ۱- تخمین مختصات اولیه ایستگاه مجهول؛
- ۲- تعریف یک همسایگی با معیار خاص حول مختصات اولیه (تعریف یک فضای جستجو با معیار اطمینان)؛
- ۳- محاسبه تابع ابهام برای هر نامزد و ذخیره یکی با بیشترین مقدار؛
- ۴- محاسبه ابهامات صحیح با استفاده از مختصات حل بهینه.

مختصات اولیه می‌تواند از روش تفاضلی سه گانه، یا حل تفاضلی دوگانه فاز حامل با ابهامات اعشاری و یا حل تفاضلی دوگانه شبه فاصله به دست آید. در صورتی که در مشاهدات جهش فاز وجود داشته باشد حل ابهامات

رساندن زمان حل از دقیقه به ثانیه معطوف شده که در همین راستا به تکنیک‌هایی همچون حل ابهام فاز دنباله‌ای^۷، روش سریع حل ابهام^۸، تکنیک جستجوی ابهام کمترین مربعات^۹، روش تابع ابهام^{۱۰} و روش لامدا^{۱۱} می‌توان اشاره کرد [۴].



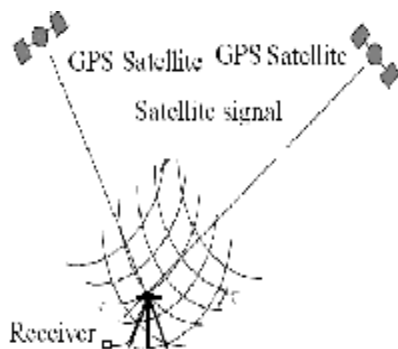
شکل ۱: الگوریتم کلی حل ابهام فاز.

الگوریتم کلی حل ابهام فاز با تخمین ابهامات اولیه (اعشاری) شروع می‌شود. حل ابهام با آزمایش ترکیب نامزدهای ابهام در یک فضای جستجوی ادامه می‌یابد. سپس معیار و اعتبار مشخصی برای آزمون ترکیبات تعیین می‌شود تا نامزدهای غلط از راه‌یابی به محاسبه نهایی بازمانند. در نهایت با مقایسه نامزدهایی که دارای معیار مورد نظر باشند، انتخاب بهترین نامزد و ارزیابی این نامزد با معیار نهایی، چرخه حل ابهام به پایان می‌رسد. این روند در شکل (۱) خلاصه شده است [۳]. هرچه تعداد ماهواره‌ها بیشتر باشد، تعداد مشاهدات افزایش می‌یابد و در نتیجه تعداد نامزدهای مشکوک کاهش یافته و حل ابهام بهتر انجام می‌پذیرد.

همان‌طوری که پیش‌تر نیز اشاره شد یکی از کاربردهای GPS برای ناوبری در دریا می‌باشد. اما مشکلی که وجود دارد اینست که محیط‌های آبی مستعد بروز جهش فاز^{۱۲} هستند که حل ابهام فاز را با چالش روبرو می‌کنند. دو دلیل عمده برای بروز جهش فاز در دریا و محیط‌های آبی وجود دارد (۱) پدیده چندمسیری سیگنال

نامزدها است. به همین صورت اگر مشاهدات اپک‌های بعدی اضافه شوند (بعد از یک دوره زمانی بلند به اندازه‌ای که هندسه ماهواره‌ها کاملاً تغییر کرده باشد)، تقاطع‌های کمتری نتیجه می‌شود.

به دلیل نامحدود بودن فضای جستجو، تقاطع به تنهایی کفایت نمی‌کند. بنابراین با مشخص نمودن یک مرز برای فضای جستجو، کاندیدها محدود می‌شوند. دو مرحله از روش تابع ابهام که در بالا ذکر شد (یافتن یک مختصات تقریبی مناسب و تعیین یک معیار برای آزمایش نقاط همسایه)، برای تعریف ناحیه‌ای بسته با تعداد محدودی کاندید به کار می‌روند. نقاط موجود در ناحیه بسته آزمایش می‌شوند که آیا در محل تقاطع همه کمان‌های ماهواره‌ها قرار گرفته‌اند یا نه. با فرض هندسه قوی ماهواره‌ها، تنها یک نقطه بهترین تقاطع را نسبت به بقیه نقاط دارد [۵].



شکل ۳: مختصات صحیح در تقاطع کمان‌ها.

حالت بهینه این است که حل AFM منحصر به فرد باشد. بنابراین تعداد و نوع مشاهدات مورد نیاز برای رسیدن به حل منحصر به فرد در روش AFM مورد توجه است. هندسه ماهواره‌ها، تأثیر خطاها بر روی مشاهدات، طول دوره مشاهدات و طول موج حامل از عوامل موثر در یکتایی جواب این روش هستند [۵].

تابع ابهام می‌تواند هم برای مشاهدات تفاضلی یگانه و هم برای مشاهدات تفاضلی دوگانه بکار رود. در حالت مشاهدات تفاضلی دوگانه، بردار فاصله غیر تفاضلی بین ماهواره و گیرنده نشان داده شده در شکل (۱) با بردار فاصله تفاضلی دوگانه جایگزین می‌شود. بنابراین با فرض عدم وجود خطا به صورت زیر فرموله می‌شود.

$$\Delta \nabla \phi = \Delta \nabla \rho + \lambda \Delta \nabla N \quad (۴)$$

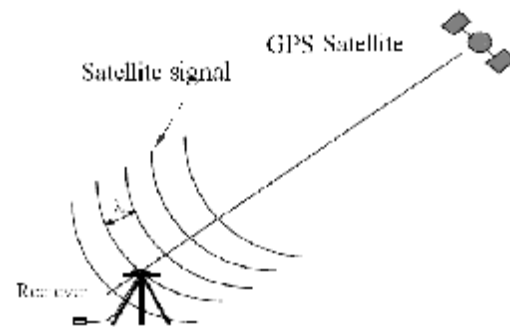
اعشاری که با کمترین مربعات حاصل می‌شود نادرست است.

تابع ابهام

برای تشریح تابع ابهام، یک مشاهده فاز حامل بدون خطا که از یک ماهواره GPS ارسال و توسط یک گیرنده دریافت می‌شود، در نظر گرفته می‌شود. معادله این مشاهده بدون خطا به صورت زیر است:

$$\phi = \Delta \phi + \lambda N \quad (۳)$$

N ابهام فاز حامل، $\Delta \phi$ خرده فاز اندازه‌گیری شده، ϕ فاز حامل و λ طول موج حامل است. اطلاعات یک ماهواره در یک اپک برای رسیدن به مختصات نقطه مجهول کافی نیست (شکل ۲).



شکل ۲: یک گیرنده و سیگنال‌های ارسالی از یک ماهواره.

مطابق شکل (۲) مشخص است که نامزدهای مختصات گیرنده می‌بایستی در امتداد کمان‌های سیگنال‌های ارسالی قرار گیرند که به اندازه یک طول موج از یکدیگر جدا شده‌اند. هر کمان بیانگر مقدار ابهام متفاوت می‌باشد. با در نظر گرفتن دو ماهواره در یک اپک، شکل (۲) به شکل (۳) تبدیل می‌شود. در واقع هر ماهواره اضافی یک جمله ابهام مجهول و یک مشاهده فاز حامل اضافه می‌کند. از دید هندسی، دو ماهواره در شکل (۳) یک منبع اطلاعاتی قوی ایجاد می‌کنند، زیرا نامزدهای مختصاتی باید در تقاطع کمان‌های ساطع شده از دو ماهواره قرار گیرند. البته در اطراف نقطه تعداد زیادی تقاطع وجود دارد که هر کدام می‌توانند به اشتباه به عنوان مختصات صحیح گرفته شوند. پس دو ماهواره (در یک اپک) برای حل ابهام فاز کفایت نمی‌کند. اما اطلاعات مفید برای حل ابهام نسبت به حالت تک ماهواره‌ای خیلی بیشتر شده است. می‌توان تصور کرد که با اضافه شدن هر ماهواره، تعداد تقاطع کمان‌ها کاهش می‌یابد که این به معنی کاهش

$$\begin{aligned} \Delta \nabla V_{ab}^{xy} &= \Delta \nabla \phi_{ab}^{xy} - \Delta \nabla \rho_{ab}^{xy} \\ &= \frac{f}{c} \Delta \nabla \rho_{ab}^{xy} + \Delta \nabla N_{ab}^{xy} - \Delta \nabla \phi_{ab}^{xy} \\ &+ \left(\frac{\Delta \nabla I_{ab}^{xy}}{f^2} + \Delta \nabla T_{ab}^{xy} + \Delta \nabla m_{ab}^{xy} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

جملات داخل پرانتز، خطاهای تفاضلی دوگانه‌اند و با فرض کوچک بودن این خطاها، باقیمانده را می‌توان به صورت ذیل نوشت [۶]:

$$\Delta \nabla \psi_{ab}^{xy} = 2\pi \Delta \nabla V_{ab}^{xy} \quad (9)$$

نکته کلیدی در تکنیک تابع ابهام این است که تغییر در عدد صحیح $\Delta \nabla N_{ab}^{xy}$ ، تابع $\Delta \nabla \psi_{ab}^{xy}$ را با ضرب 2π تغییر می‌دهد. کسینوس این تابع از چنین تغییری تأثیر نمی‌پذیرد زیرا:

$$\begin{aligned} \cos(\Delta \nabla \psi_{ab}^{xy}) &= \cos(2\pi \Delta \nabla V_{ab}^{xy}) \\ &= \cos\{2\pi(\Delta \nabla V_{ab}^{xy} + \Delta \nabla N_{ab}^{xy})\} \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن $\Delta \nabla N_{ab}^{xy}$ هر عدد صحیحی می‌تواند باشد. برای مشاهدات دوفرکانسی، $(S-1)(R-1)$ مشاهده تفاضلی دوگانه وجود دارد که R تعداد گیرنده‌ها و S تعداد ماهواره‌هاست. فرض کنیم این مشاهدات وابسته نیستند و همه مشاهدات با وزن برابر در نظر گرفته می‌شوند، در این صورت مجموع مربعات باقی مانده برابر خواهد بود با:

$$\begin{aligned} V^T P V(X_m, Y_m, Z_m, \Delta \nabla N_{ab,L}^{xy}) \\ &= \sum_{L=1}^2 \sum_b^{R-1} \sum_y^{S-1} (\Delta \nabla V_{ab,L}^{xy})^2 \\ &= \frac{1}{4\pi^2} \sum_{L=1}^2 \sum_b^{R-1} \sum_y^{S-1} (\Delta \nabla \psi_{ab,L}^{xy})^2 \end{aligned} \quad (11)$$

با توجه به ثابت بودن موقعیت ایستگاه a ، متغیرهایی که این تابع را مینیمم می‌کنند، مختصات ایستگاه b و ابهامات هستند. در نهایت تابع ابهام به این گونه تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} AF(X_m, Y_m, Z_m) &= \sum_{L=1}^2 \sum_b^{R-1} \sum_y^{S-1} [\cos(\psi_{ab,L}^{xy})] \\ &= \sum_{L=1}^2 \sum_b^{R-1} \sum_y^{S-1} \cos\left[2\pi\left(\frac{fL}{c} \Delta \nabla \rho_{ab}^{xy} + \Delta \nabla N_{ab}^{xy} - \Delta \nabla \phi_{ab}^{xy}\right)\right] \\ &= \sum_{L=1}^2 \sum_b^{R-1} \sum_y^{S-1} \cos\left[2\pi\left(\frac{fL}{c} \Delta \nabla \rho_{ab}^{xy} - \Delta \nabla \phi_{ab}^{xy}\right)\right] \end{aligned} \quad (12)$$

جملات یونسفر، تروپوسفر و چندمسیری در این معادله آورده نشده‌اند. البته آنها وجود دارند و بر روی تکنیک تابع ابهام و دیگر روش‌ها تأثیر می‌گذارند. اگر این خطاها را ناچیز فرض کرده و موقعیت گیرنده دقیقاً معلوم باشد، معادله بالا نشان می‌دهد که بیشینه مقدار تابع ابهام

در هر اپک و برای هر زوج ماهواره، مشاهدات تفاضلی دوگانه فاز حامل $(\Delta \nabla \phi)$ اندازه‌گیری و فاصله تفاضلی دوگانه ماهواره-گیرنده $(\Delta \nabla \rho)$ با استفاده از مختصات آزمایشی گیرنده محاسبه می‌شود. اگر از مختصات واقعی گیرنده برای محاسبه $\Delta \nabla \rho$ استفاده شود، $\Delta \nabla N$ می‌بایستی یک عدد صحیح باشد.

بر خلاف سایر روش‌ها، حل ابهام فاز با AFM مستقیماً بدنبال مختصات است نه عدد ابهام N . معادله به گونه‌ای تغییر داده می‌شود که عدد صحیح N از معادلات حذف شود به همین منظور فضای حقیقی به فضای موهومی تغییر می‌یابد. تابع ابهام از همین اصل و به کارگیری خصوصیات بردار مختلط (شکل ۴) استفاده کرده و مختصات صحیح را می‌یابد.

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad (5)$$

که در آن θ زاویه پادساعتگرد است.

ویژگی بردار موهومی ثابت ماندن مقدار فاز، یا به عبارت دیگر خرده فاز به ازای هر تعداد سیکل کامل است شکل (۴). در اینجا θ به عنوان اختلاف بین مشاهده تفاضلی دوگانه فاز حامل و فاصله تفاضلی دوگانه محاسبه شده با مختصات گیرنده و مختصات ماهواره است [۵].

$$\theta = \Delta \nabla \phi_{ab}^{xy} - \Delta \nabla \rho_{ab}^{xy} \quad (6)$$

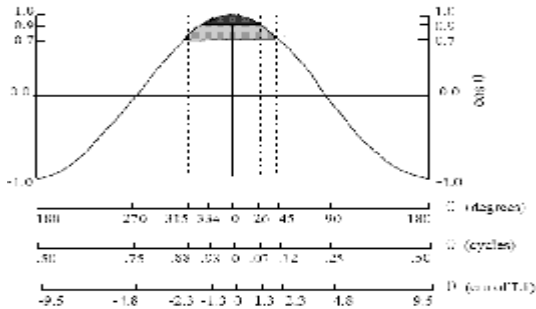
در صورتی که مختصات گیرنده به درستی انتخاب شده باشد، تفاضل فاز حامل مشاهداتی با فاصله محاسباتی ماهواره تا گیرنده تنها در تعداد سیکل‌های صحیح فاز با هم اختلاف دارند. این شرایط می‌بایستی برای همه مشاهدات انجام گرفته صادق باشد و بردار موهومی کمک خوبی در جهت حل مسئله است.

معادله کلی تابع ابهام به فرم ذیل است [۶]:

$$AF(x, y, z) = \sum_{k=1}^{nepoch} \sum_{j=1}^{nsat-1} e^{2\pi i(\Delta \nabla \phi_{obs}^{kj} - \Delta \nabla \rho_{calc}^{kj})} \quad (7)$$

که در آن $AF(x, y, z)$ تابع ابهام برای یک نقطه خاص (آزمایشی)، $\Delta \nabla \phi_{obs}^{kj}$ فاصله تفاضلی دوگانه مشاهداتی و $\Delta \nabla \rho_{obs}^{kj}$ فاصله تفاضلی دوگانه محاسباتی نقطه است. فقط بخش حقیقی $e^{2\pi i}$ (کسینوس) نیاز به محاسبه دارد و مختصات منتسب به مقدار بیشینه تابع ابهام، مختصات مجهول مورد نظر است. مقادیر ابهام محاسبه شده برای این نقطه، به اعداد صحیح بسیار نزدیک‌اند. بنابراین می‌توان نوشت:

مقدار ذخیره می‌شود و در نهایت نامزدی که بیشینه مقدار تابع ابهام را داراست با مختصاتش به عنوان خروجی داده می‌شود. این مختصات برای محاسبه طول تفاضلی دوگانه به منظور محاسبه ابهام‌های معادله (۲) به کار می‌رود.



شکل ۴: انتخاب مقدار آستانه بمنظور حذف نامزدهای غلط به همراه اطمینان از عدم رد جواب صحیح (منبع شکل مرجع [۱] می‌باشد).

ε هر عددی می‌تواند باشد که هم روی سرعت حل ابهام و هم روی صحت حل ابهام موثر است. اگر با قرار دادن عدد اشتباه، کاندید صحیح از دست رود، جستجو بین باقیمانده کاندیداها بی‌فایده است. در واقع موضوع مهم این است که مطمئن باشیم مختصات صحیح حذف نمی‌شود. ارتباط بین بیشینه مقدار رابطه (۱۴) و بهترین تقریب ابهام به یک عدد صحیح در شکل (۴) نشان داده شده است. در پایین شکل (۴) محور افقی برای سه واحد زاویه، سیکل و سانتی متر برای موج حامل L_1 آمده است.

فضای جستجو

در تکنیک تابع ابهام نیاز به یک سری نقاط حول نقطه اولیه^{۱۵} با یک سری شرایط خاص می‌باشد.

جستجوی شبکه‌ای

در جستجوی شبکه‌ای، محدوده‌ای حول نقطه اولیه با فاصله نقاط برابر جستجو می‌شود. نقطه اولیه در مرکز این فضا قرار بوده و نقطه صحیح در این محدوده قرار گرفته است. فضای جستجو می‌تواند مکعب باشد یا اینکه در امتداد هر محور، ابعاد متفاوت داشته باشد. در تقاطع هر شبکه، تابع ابهام محاسبه می‌شود.

در حل سریع ابهام فاز دو فاکتور دیگر نیز اهمیت دارند. یکی تعداد اپک‌های مورد نیاز و دیگری مدت زمان انجام محاسبات (آزمایش نامزدها) است. مدت زمان انجام

از $2(R-1)(S-1)$ است، زیرا کسینوس هر جمله، واحد است. نويز مشاهدات باعث می‌شود مقدار واقعی ابهام کمی از بیشینه کاهش یابد. از آن جا که تابع ابهام به خود ابهام وابسته نیست، وجود جهش فاز بر روی مشاهدات مورد استفاده تأثیری در تابع ابهام ندارد، زیرا جهش فاز تنها بر تعداد سیکل‌ها اثر گذار است [۷]. این ویژگی مهم‌ترین مزیت تابع ابهام است که نسبت به دیگر روشهای حل ابهام فاز به‌طور منحصر به فردی جلوه می‌کند.

به دلیل کوچکی مقدار تابع $\Delta \nabla \psi_{ab}^{xy}$ (معمولا حدود چند صدم سیکل)، تابع کسینوس را می‌توان به صورت ذیل بسط داد و جملات مراتب بالاتر را حذف کرد.

$$\begin{aligned} AF(X_m, Y_m, Z_m) &= \sum_{L=1}^2 \sum_b^{R-1} \sum_y^{S-1} [\cos(\psi_{ab,L}^{xy})] \\ &= \sum_{L=1}^2 \sum_b^{R-1} \sum_y^{S-1} [1 - \frac{(\psi_{ab,L}^{xy})^2}{2!} + \dots] \\ &= 2(R-1)(S-1) - \frac{1}{2} \sum_{L=1}^2 \sum_b^{R-1} \sum_y^{S-1} (\psi_{ab,L}^{xy})^2 \\ &= 2(R-1)(S-1) - 2\pi^2 V^T P V \end{aligned} \quad (13)$$

مشخص است که روش تابع ابهام و روش کمترین مربعات معادل یکدیگرند، در نقطه همگرایی، تابع ابهام بیشینه و $V^T P V$ کمینه است [۶].

معیار اطمینان

نحوه اجرای الگوریتم به این شکل است که برای هر کاندید، در همه اپک‌های موجود، تمامی مشاهدات تفاضلی دوگانه محاسبه می‌شوند. برای هر مشاهده، طبق رابطه زیر، کسینوس فاصله تفاضلی دوگانه مشاهداتی منهای محاسباتی تعیین می‌گردد.

$$\cos\{2\pi(\Delta \nabla \phi_{ab}^{xy} - \Delta \nabla \rho_{ab}^{xy})\} < \varepsilon \quad (14)$$

اگر این مقدار از یک حدی کمتر باشد، این نامزد بسرعت رد شده و نامزد بعدی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به منظور تسریع حل ابهام فاز این مقدار آستانه می‌بایستی بگونه‌ای انتخاب گردد که نامزد غلط به سرعت شناسایی شود. البته توجه شود که مختصات صحیح از دست نرود، زیرا ادامه جستجو بی‌فایده خواهد بود. این یکی از فاکتورهای سرعت در حل تابع ابهام است.

در صورتی که یک مشاهده از مقدار آستانه قرار داده شده عبور کند، مقدارش با دیگر مقادیر رابطه (۱۴) جمع می‌گردد. یک بار که همه مشاهدات مربوط به یک نامزد چک شدند، مقدار تابع ابهام و مختصات منتسب به این

نرم‌افزار 2.35 GPSurvey استفاده گردید. محاسبات با یک پردازنده پنتیوم IV و ۱/۸۳ گیگاهرتز در نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته است. عین این آزمون در خصوص مشاهده L2 انجام گرفت که نتیجه در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲: حل ابهام فاز به روش AFM با فواصل جستجوی متفاوت برای L₂

وضعیت حل	مقدار خطا (متر)	مقدار تابع ابهام	فاصله شبکه جستجو (سانتی متر)	تعداد اپک استفاده شده	طول مکعب (متر)
درست	۰/۰۱۳	۰/۹۹۵	$\lambda/10$	۴۰	۱
درست	۰/۰۴۳	۰/۹۴۱	$\lambda/5$	۴۰	۱
نادرست	-	-	$\lambda/2$	۴۰	۱

با ۴۰ اپک مشاهداتی حل ابهام فاز بخوبی امکان پذیر است. در ردیف اول جداول (۱) و (۲) فاصله نقاط شبکه جستجو به ترتیب حدود ۲ و ۲/۵ سانتی متر بوده و یافتن نامزد درست با دقت بالایی صورت گرفته است. در این حالت تعداد نامزدها مثلاً برای مشاهده فاز حامل L₂ و ابعاد ۱ متر برابر ۶۴۰۰۰ بود. با افزایش فاصله شبکه به $\lambda/5$ ، تعداد نامزدها به ۸۰۰۰ کاهش یافته و حل ابهام فاز بخوبی ولی با دقت کمتر انجام شد. زمان محاسبات نیز با ضریب ۲ کاهش یافت. با انتخاب فواصل جستجو بیشتر از $\lambda/5$ عملاً دیده شد که مختصات صحیح در میان فواصل جستجو از دست رفت.

بخش دوم این آزمون عددی به بررسی تاثیر تعداد مشاهدات بر نتایج پرداخته شد. در شکل (۵) مقدار تابع ابهام مشاهده L₂ با ۸۰۰۰ کاندید و فاصله جستجو ۵ سانتی متری و برای ۱ اپک مشاهداتی با ۶ ماهواره قابل دسترس، دیده می‌شود. کثرت مشاهدات غیر صفر به خوبی مشهود است.

در شکل (۶) مقدار تابع ابهام مشاهده L2 با ۸۰۰۰ کاندید و فاصله جستجو ۵ سانتی متری و برای ۵۰ اپک مشاهداتی با ۶ ماهواره قابل دسترس، دیده می‌شود. در حالت محاسبه با یک اپک مشاهداتی، اختلاف میان نامزدها کم بوده و گاهی باعث اشتباه در حل ابهام می‌شود. هنگامی که از تعداد اپک بیشتری در حل ابهام استفاده شود، احتمال این که جواب صحیح به دست آید

محاسبات به ابعاد فضای جستجو و فاصله شبکه جستجو بستگی دارند که تعداد نامزدها را مشخص می‌کنند. ابعاد فضای جستجو با دقت نقطه اولیه تعریف می‌شود. مثلاً اگر مختصات تقریبی نقطه با روش DGPS به دست آمده باشد، ابعاد مکعب می‌بایستی ۲ یا ۳ متر انتخاب گردد. تغییرات ارتفاع یک نقطه در دریا مقداری مشخص است و حدود یک متر است. این خصوصیت در دریا موجب کاهش بعد ارتفاعی مکعب جستجو و در نتیجه کاهش زمان جستجو می‌شود.

هنگامی که در فضای جستجو، فواصل شبکه جستجو افزایش داده شود تقریب نقاط آزمایش شده از نقطه اصلی، دقت کمتری خواهد داشت و احتمال این که مقدار رابطه ۱۴ برای نقطه صحیح از ϵ کمتر شود افزایش می‌یابد. برای حصول اطمینان از اینکه نقطه صحیح از دست نمی‌رود، می‌بایستی مقدار آستانه را کاهش داد.

مشاهدات و مطالعه موردی

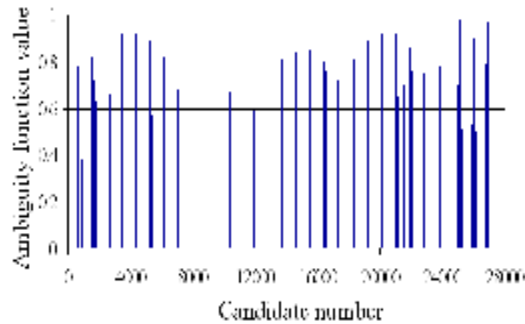
بخش اول این آزمون عددی به بررسی رابطه بین فاصله شبکه جستجو و زمان مورد نیاز برای محاسبات در حل ابهام اختصاص یافته است. نتایج بدست آمده از حل ابهام فاز با تابع ابهام برای مشاهده L₁ با روش تفاضلی دوگانه و طول باز ۱.۹۹۹ متری در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱: حل ابهام فاز به روش AFM با فواصل جستجوی متفاوت برای L₁

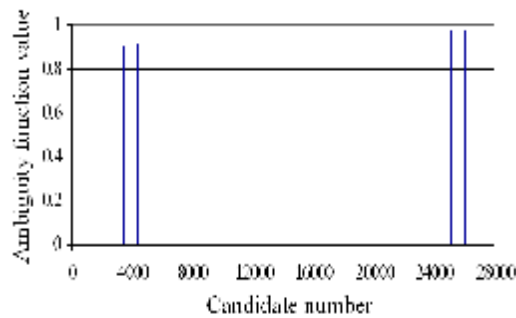
وضعیت حل	مقدار خطا (متر)	مقدار تابع ابهام	فاصله شبکه جستجو (سانتی متر)	تعداد اپک استفاده شده	طول مکعب (متر)
درست	۰/۰۱۹	۰/۹۷۹	$\lambda/10$	۴۰	۱
نادرست	۰/۰۲۹	۰/۹۰۶	$\lambda/5$	۴۰	۱
نادرست	-	-	$\lambda/2$	۴۰	۱

در زمان ۴۰ اپک مشاهداتی، شش ماهواره با کدهای PRN ۸، ۱۰، ۱۳، ۲۳، ۲۷، ۳۰ و ۲۸ در دسترس قرار داشتند. مختصات یک ایستگاه معلوم^{۱۶} و مختصات ایستگاه دیگر مجهول^{۱۷} بوده است. تمامی محاسبات انجام گرفته در این متن به روش تفاضلی دوگانه است. در نتایج عددی، دو هدف اساسی دنبال می‌شد، یکی درستی نتایج به دست آمده از حل روش AFM و دیگری تلاش در جهت افزایش سرعت محاسبات بوده است. جهت کنترل درستی نتایج از

ادامه جستجو بی‌فایده است. همچنین انتخاب مقدار آستانه، با فاصله شبکه جستجو ارتباط مستقیم دارد. مثلاً هنگامی که فاصله جستجو $\lambda/5$ است، فاصله شبکه جستجو را باید کمتر از 0.7 در نظر گرفت.



شکل ۷: تعداد نامزدهای مختصات صحیح با پنجاه اپک مشاهداتی.



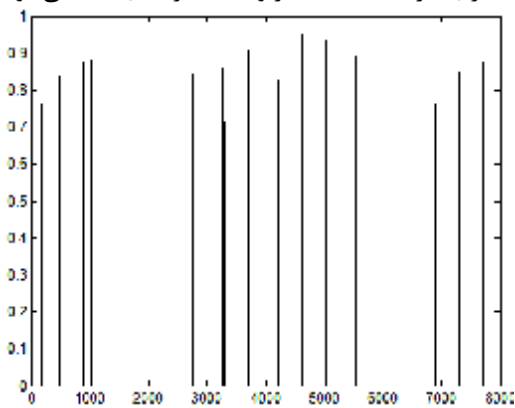
شکل ۸: تعداد نامزدهای مختصات صحیح با پنجاه اپک مشاهداتی.

در بخش چهارم این آزمون عددی نتیجه اعمال قید ارتفاعی بر تعداد نامزدها بررسی شد. تغییرات ارتفاع سطح آب دریا در مدت زمان کم، محدود بوده و با معلوم بودن تغییرات سطح آب دریا در یک بازه زمانی، می‌توان در تسریع حل ابهام فاز استفاده کرد. در شکل (۹) تغییرات ارتفاع سطح آب دریای خلیج فارس در بندر بوشهر آمده است. مشاهدات با قرار دادن یک گیرنده GPS در ایستگاه مرجع در خشکی و یک گیرنده در کشتی انجام شده است. در ۶۵۰۰ دوره مشاهداتی (برحسب ثانیه)، اختلاف بین بیشینه ارتفاع سطح آب با کمینه آن در حدود یک متر است و در ۱۰۰۰ اپک مشاهداتی، حداکثر پنجاه سانتی‌متر است. با وارد کردن کانسترنیت ارتفاعی، بعد ارتفاعی مکعب جستجو تغییر کرده و تعداد نامزدها کاهش می‌یابد. سرعت محاسبات با ضربی در حدود ۲ افزایش می‌یابد.

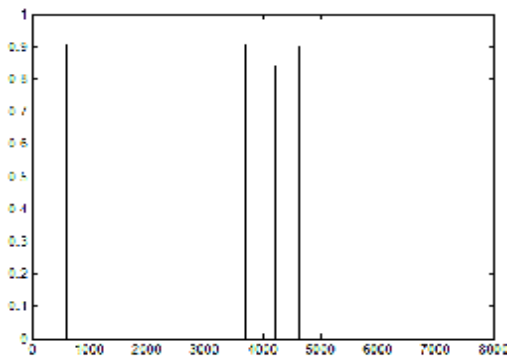
زیاد است. در واقع افزایش تعداد مشاهدات، شانس کمتری به کاندیدهای غلط می‌دهد و اطمینان از خروجی روش را افزایش می‌دهد.

در بخش سوم آزمون عددی نحوه تاثیر مقدار آستانه بر تعداد نامزدها مورد بررسی قرار گرفت. انتخاب مقدار آستانه، برای حذف سریع نامزد غلط به کار می‌رود. همه مشاهده‌های مربوط به یک نامزد با این معیار سنجیده می‌شوند در این بخش با دو گراف، تاثیر انتخاب صحیح مقدار آستانه نشان داده شده است.

در شکل (۷)، مقدار آستانه عدد صفر در نظر گرفته شد. همان‌طور که دیده می‌شود در پایان محاسبه تابع ابهام، نامزدهای زیادی وجود دارند. اما در شکل (۸) مقدار آستانه عدد 0.7 انتخاب شد که با این مقدار، بیشتر نامزدهای غلط در همان مشاهده اول رد می‌شوند و زمان کمتری صرف محاسبات مربوط به نامزدهای غلط می‌شود.



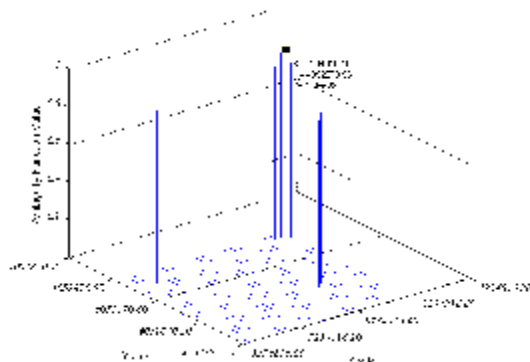
شکل ۵: تعداد کاندیدهای مختصات صحیح برای یک اپک مشاهداتی.



شکل ۶: تعداد کاندیدهای مختصات صحیح برای پنجاه اپک مشاهداتی.

توجه شود که انتخاب مقدار بزرگ آستانه ممکن است به از دست رفتن جواب صحیح منجر شود، در این صورت

نقطه ماکزیمم، نامزدهایی با مقادیر قله کمتر حضور داشته باشند.

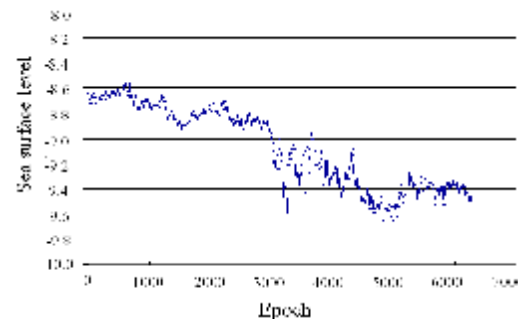


شکل ۱۰: وجود نقاط با قله کمتر در اطراف نقطه ماکزیمم.

همچنین در تمامی آزمایشات، هنگامی که مقادیر نرمال تابع ابهام از ۰/۹۰ بیشتر بود، هیچ مورد اشتباهی مشاهده نشد و این خود می‌تواند یکی از معیارهای اطمینان باشد.

بحث و نتیجه

حل سریع ابهام فاز با AFM، نیازمند کاهش اثر خطاها بر مشاهده فاز حامل است که مشاهدات تفاضلی کمک شایانی در تحقق این هدف می‌کنند. البته برای خطای چند مسیری می‌بایستی تمهیداتی خاص اندیشیده شود. دقت مختصات اولیه، ابعاد فضای جستجو را تعیین می‌کند که حل شناور ابهام و مشاهده شبه‌فاصله تفاضلی دو روش برای تحقق این هدف هستند. در مسئله حل سریع ابهام، حل شناور ابهام برای مختصات اولیه بهتر است به کار گرفته نشود زیرا در تعداد اپک کم، دقت مناسبی نداشته و در برابر جهش فاز آسیب‌پذیر است. به کارگیری مشاهده شبه‌فاصله تفاضلی برای تخمین موقعیت اولیه نیازمند گیرنده‌ای است که اثرات چندمسیری و نویز گیرنده بر روی کدکرولاتور^{۱۸} آن کم باشد، که گیرنده‌ای که از ساختار Narrow correlator بهره می‌گیرد، برای روش حل سریع ابهام با AFM پیشنهاد می‌شود. با اجرای این تمهیدات، در تعداد اپک کم (کمتر از ۱۰۰ اپک)، احتمال موفقیت بالا می‌رود. مساله‌ای که باقی می‌ماند مدت زمان عملیات جستجو است که با در نظر گرفتن عدد آستانه مناسب (ϵ) و به کارگیری چند پردازنده بصورت موازی و افزایش فاصله شبکه جستجو به حدود $\lambda/5$ قابل حل است. در پایان یادآور می‌شویم که عدم اثر پذیری روش



شکل ۹: تعداد نامزدهای مختصات صحیح با پنجاه اپک مشاهداتی.

پس از پایان محاسبات روش AFM، یک مختصات از بین نامزدها به عنوان خروجی داده می‌شود. این نامزد، بیشترین مقدار تابع ابهام نرمالیزه شده را در بین سایرین در اختیار داشت. اما ممکن است بر به دلایلی از جمله، ازدیاد خطاها، انتخاب فاصله شبکه بزرگ، انتخاب مقدار آستانه بزرگ و یا کوچک گرفتن ابعاد فضای جستجو، خروجی الگوریتم حل ابهام فاز اشتباه باشد. یکی از معیارهای اطمینان از صحت حل ابهام فاز، صحیح بودن (غیر اعشاری بودن) مقادیر ابهام فاز است. در مطالعه انجام شده ماهواره‌های ۸، ۱۰، ۱۳، ۲۳، ۲۷ و ۲۸ در دید بودند که ماهواره ۸ به عنوان ماهواره مرجع گرفته شد. ابهامات تفاضلی سایر ماهواره‌ها نسبت به ماهواره ۸ به ترتیب برابر بودند با -۱، ۳، ۰، ۲ و ۶. مقادیر ابهامات برآورد شده از خروجی تابع ابهام محاسبه شدند (برگرداندن مختصات به ابهام فاز) که نتایج به دست آمده به ترتیب عبارت اند از $-1/0.3$ ، $0.2/0.0099$ ، $1/0.97$ و $6/0.2$. همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر ابهام به دست آمده به اعداد صحیح بسیار نزدیک هستند و نشان از درستی محاسبات دارد. در این حالت می‌توان ابهامات را تصحیح نمود و به مختصات دقیق‌تر رسید. در نتایج عددی دیده شد که نامزدهای اطراف مختصات درست، جزء نامزدهای نهایی بوده‌اند. به این معنی که در اطراف بالاترین قله، قله‌های کوچکتری نیز قرار دارند. در شکل (۱۰) دیده می‌شود که مختصات درست با عدد تابع ابهام نرمالیزه شده ۰/۹۸ انتخاب شده و در اطراف آن سایر نامزدها با قله‌های کوچکتر حضور دارند. در صورتی که مقدار تابع ابهام دو نامزد با ماکزیمم مقدار به هم نزدیک بود، مثلاً کمتر از ۰/۰۵ بود، می‌بایستی در انتخاب کاندید احتیاط کرد. در دو صورت مقدار ماکزیمم را به عنوان مختصات صحیح می‌توان برگزید، یکی فاصله دو نقطه کمتر از ۱۰ سانتی‌متر باشد، یا این که در اطراف

AFM از پدیده جهش فاز و امکان کاهش فضای جستجو با افزودن کانسترنیت ارتفاعی مزایای بزرگی بوده و موجب بهبود تابع ابهام در محیط‌های آبی می‌گردد و لذا برای حل مساله ابهام فاز در محیط دریائی پیشنهاد می‌شود.

مراجع

- 1 - Ryan S., Petovello M. and Lachapelle G. (1998) "Augmentation of GPS for Ship Navigation in Constricted Water Ways." *Proceedings of the ION National Technical Meeting*, Long Beach CA, January 21 – 23.
- 2 - Raquet, J. (1998). *Development of a Method for Kinematic GPS Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers*. PhD thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary.
- 3 - Qiu, W. (1992). *An Analysis of Some Critical Error Sources in Static GPS Surveying*. Degree of master of science. Department of geomatics engineering Calgary .
- 4 - Teunissen, P and Kleusberg, A. (1997). *GPS For Geodesy*. Second Completely Revised and Extended Edition. Springer. Printing in Mercedsdruk, Berlin.
- 5 - Erickson, C. (1992). *Investigations of C/A Code and Carrier Measurements and Techniques for Rapid Static GPS Surveys*. Master of Science in Geomatics Engineering. Thesis. Geomatics Engineering, University of Calgary. Canada.
- 6 - Leick, Alfred. (1994). *GPS Satellite Surveying*. Department of Surveying Engineering, University of Maine. A Wiley-Interscience publication.
- 7 - Remondi, B. (1991). "Pseudo-kinematic GPS Results using the ambiguity function method." *Journal of The Institute of Navigation*, Vol. 38, No. 1, Spring 1991,,Printed in U.S.A.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Ambiguity Solution
- 2 - Global Positioning System (GPS)
- 3 - Carrier Phase
- 4 - Multipath
- 5 - Differential
- 6 - Rover
- 7 - Sequential Phase Ambiguity Resolution
- 8 - Fast Ambiguity Resolution Approach
- 9 - Least Squares Ambiguity Search Technique
- 10 - Ambiguity Function Method (AFM)
- 11 - LAMDA
- 12 - Cycle slip
- 13 - Float Ambiguity
- 14 - Ambiguity Function Method
- 15 - Initial Point
- 16 - Reference Station
- 17 - Rover Station
- 18 - Code correlator