

استفاده از خطای چندگانگی مسیر سیگنال‌های GPS برای آشکارسازی تغییر شکل سطوح

اصغر راست‌بود

عضو هیأت علمی گروه مهندسی نقشه‌برداری دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۰۹۱۴-۳۰۰۴۸۷۸

arastbood@yahoo.com

arastbood@tabrizu.ac.ir

چکیده

بسیاری از سازه‌های ساخت دست بشر و ساختارهای طبیعی مانند ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها و زمین‌های شیب‌دار تحت انواع گوناگون تغییر شکل‌ها قرار دارند. بررسی دقیق تغییر شکل دائمی این ساختارها اطلاعات اساسی از پایداری و ایمنی آنها در اختیار ما قرار می‌دهد. GPS نیز ابزار بسیار سودمندی جهت بررسی تغییر شکل سازه‌ها فراهم کرده است که نسبت به تکنیک‌های نقشه‌برداری متعارف که کمیت‌های هندسی نسبی (یعنی فواصل، زوایا و اختلاف ارتفاعات) ما بین نقاط انتخابی را اندازه‌گیری می‌کنند و نیز تکنیک‌هایی که از ابزار ژئوتکنیکی استفاده می‌کنند، مزایای زیادی دارد. معمولاً GPS دقیق‌تر، مؤثرتر و تا حد زیادی خودکار بوده و به کار کمتری نیاز دارد. اما GPS عیوب خاص خود را برای چنین کاربردهایی دارد. یک عامل محدود کننده برای استفاده از GPS در مقیاس بزرگ هزینه بالای آن است. با روش‌های استاندارد استفاده از GPS، اگر گیرنده‌های دائمی GPS برای بررسی تغییر شکل‌ها استفاده شوند، یک گیرنده برای هر نقطه‌ای که نیاز به بررسی دارد لازم است. اگر تعداد زیادی نقطه برای بررسی وجود داشته باشد، هزینه سخت افزاری خیلی گران بوده و برای بسیاری از کاربردهای عملی یک عامل بازدارنده است. GPS برای چنین کاربردهایی به خاطر هزینه بالای آن زیاد استفاده نمی‌شوند.

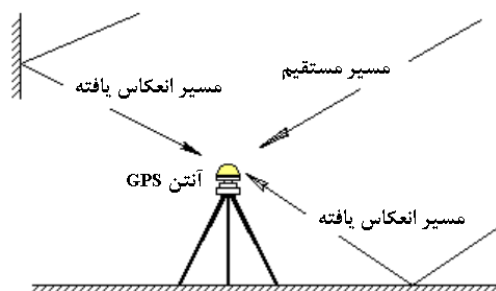
یکی از منابع خطای سیگنال‌های GPS خطای چندگانگی مسیر می‌باشد که برای تعیین موقعیت دقیق بایستی با این خطا مقابله نمود، ولی در این مقاله روشی برای تعیین تغییر شکل یک سطح معرفی می‌شود که از سیگنال‌های چندگانگی مسیر GPS استفاده می‌کند. روشی که معرفی می‌شود این حسن را دارد که یک آنتن برای بررسی چند نقطه یا کل منطقه بکار می‌رود و بنابراین از نظر کاهش هزینه‌ها روش خیلی مؤثری است.

در این مقاله نخست در مورد اثر چندگانگی مسیر GPS بحث خواهد شد. سپس مرور مختصری در مورد روش‌های مختلف آشکارسازی و کاهش این خطا صورت خواهد گرفت و سپس اصول اساسی تست و محاسبه تغییر شکل‌ها با استفاده از سیگنال‌های چندگانگی مسیر مطرح خواهد گردید.

کلمات کلیدی: آشکارسازی، چندگانگی مسیر، سازه، انحراف فاز.

۱- مقدمه

در اثر این پدیده به علت وجود سطوح منعکس کننده در اطراف گیرنده علاوه بر سیگنال مستقیم، یک یا چند سیگنال منعکس شده از سطوح دیگر نیز پس از طی دو یا چند مسیر مختلف به آنتن گیرنده می‌رسند (شکل ۱). سطوح منعکس کننده می‌توانند افقی، قائم یا مایل باشند و به عنوان مثال برای این سطوح می‌توان از خیابان‌ها، ساختمان‌ها، شاهراه‌ها و وسائل نقلیه نام برد، به همین خاطر بایستی در انتخاب محل مشاهده این عوامل را در نظر داشته باشیم. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این پدیده به هندسه ماهواره‌ها و محیط اطراف گیرنده بستگی دارد و یک خطای سیستماتیک بوده و می‌تواند به عنوان خطای تصادفی نیز تلقی گردد.



شکل ۱- نمایش رخداد پدیده چندگانگی مسیر

به علت موقعیت‌های هندسی مختلفی که در اطراف گیرنده وجود دارد مدل خاصی برای چندگانگی مسیر ارائه نشده است. این پدیده هم بر اندازه‌گیری‌های کد و هم بر اندازه‌گیری‌های فاز مؤثر است. اثر چندگانگی مسیر روی مشاهدات با فرکانس مشاهده نسبت معکوس دارد، به همین دلیل اثر آن روی مشاهدات کد بیشتر از مشاهدات فاز است.

تأثیر این پدیده را می‌توان با استفاده از ترکیب کد و فاز حامل برآورد کرد. این کار با تکیه بر این حقیقت صورت می‌گیرد که تروپسفر، خطای ساعت و اثر نسبیت بر روی کد و فاز به یک اندازه تأثیر می‌گذارد در حالی که اثر یونسفر و چندگانگی مسیر وابسته به فرکانس می‌باشند به این ترتیب با داشتن مشاهدات کد و فاز حامل که عاری از اثر یونسفر شده باشند و تشکیل تفاضل‌های مربوطه اثر چندگانگی مسیر به مقدار زیادی مرتفع می‌گردد.

وقتی که سیگنال‌های چندگانگی مسیر با سیگنال‌های مستقیم از ماهواره‌ای تداخل می‌کنند انحراف فاز ایجاد می‌شود و بنابراین اندازه‌گیری‌ها غیر صحیح می‌شوند. پدیده چندگانگی مسیر یکی از منابع عمده خطا در تعیین موقعیت با GPS می‌باشد. این پدیده می‌تواند به آسانی خطایی در حدود ۲۰-۱۰ متر در اندازه‌گیری‌های شبه فاصله کد GPS ایجاد کند. در محیط‌های خاص مثلاً در مجاورت ساختمان، خطای منتج از چندگانگی مسیر می‌تواند به بزرگی ۱۰۰ متر نیز باشد. اثر چندگانگی مسیر روی فاز حامل به یک چهارم طول موج یعنی چند سانتی‌متر می‌رسد. چون اثر چندگانگی مسیر نمی‌تواند با روش‌های تفاضلی حذف شود، مسئله مهمی در تعیین موقعیت با دقت بالاست.

اثر چندگانگی مسیر به محیط اطراف ایستگاه مشاهده یا به هندسه آنتن نسبت به محیط بستگی دارد. تغییر ارتفاع گیرنده می‌تواند منجر به افزایش اثر چندگانگی مسیر شده و نتایج خراب شوند. به خاطر این حساسیت بالا حذف اثر چندگانگی مسیر در پردازش اطلاعات خیلی مشکل است.

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی برای حذف یا کاهش اثر چندگانگی مسیر انجام شده است که به طور خلاصه اشاره ای به این روش‌ها خواهد شد [۳].

(۱) ساده‌ترین و مستقیم‌ترین راه حل انتخاب دقیق محل ایستگاه می‌باشد.
(۲) روش معروف دیگر استفاده از حلقه فقل تأخیر برآورد کننده چندگانگی مسیر (MEDLL) است در این روش با استفاده از یک آرایه از همبستگی سنج‌ها و اندازه‌گیری تابع همبستگی دریافت شده سیگنال ورودی به سیگنال‌های مستقیم و غیر مستقیم تفکیک می‌شود.

(۳) یک روش نیز بهبود آنتن گیرنده‌هاست. نشان داده شده است که آنتن‌های با طرح‌های خاص می‌توانند آثار چندگانگی مسیر را به طور مؤثر کاهش دهند، پس انتخاب نوع آنتن نیز نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند.

(۴) استفاده از مواد جذب کننده ماکرویو نیز می‌تواند به میزان زیادی خطای چندگانگی مسیر را از بین ببرد.

(۵) روشی نیز جهت آشکارسازی و کاهش اثر چندگانگی مسیر در حوزه طیفی پیشنهاد شده است. در این روش اطلاعات اندازه‌گیری شده با تبدیل سریع فوریه به حوزه طیفی منتقل می‌شوند. آشکارسازی و کاهش چندگانگی مسیر با فیلترکردن دامنه انجام می‌شود.

(۶) روش معمول دیگر میانگین‌گیری زمانی است. در این روش با میانگین گرفتن از نسبت فاز مستقیم به فاز منعکس شده در یک فاصله زمانی بلند می‌توانیم خطای چندگانگی مسیر را که در حدود یک سیکل باشد از روی داده‌ها برداریم. البته این روش برای کارهای کینماتیک روش مؤثری نیست.

(۷) اثر خطای چندگانگی مسیر بر روی مشاهدات فاز موج حامل نسبت به مشاهدات کد دو مرتبه کوچکتر است. فاز موج حامل ترکیب شده با کد می‌تواند اثر خطای چندگانگی مسیر روی شبه فاصله را کاهش دهد.

(۸) در صورت به وجود آمدن پدیده چندگانگی مسیر جهت پلاریزاسیون سیگنال منعکس شده از راست گرد به چپ گرد عوض خواهد شد و می‌توان با جلوگیری از ورود سیگنال‌های چپ گرد تا حدودی از این خطا جلوگیری نمود. بنابراین با استفاده از آنتن‌هایی که برای سیگنال‌های پلاریزه راست گرد طراحی شده‌اند، می‌توان سیگنال‌های با پلاریزاسیون مخالف را کم نمود، اما در حالتی که سیگنال انعکاس‌هایی با تعداد زوج داشته باشد این روش مؤثر نیست زیرا مجدداً راست گرد خواهند شد.

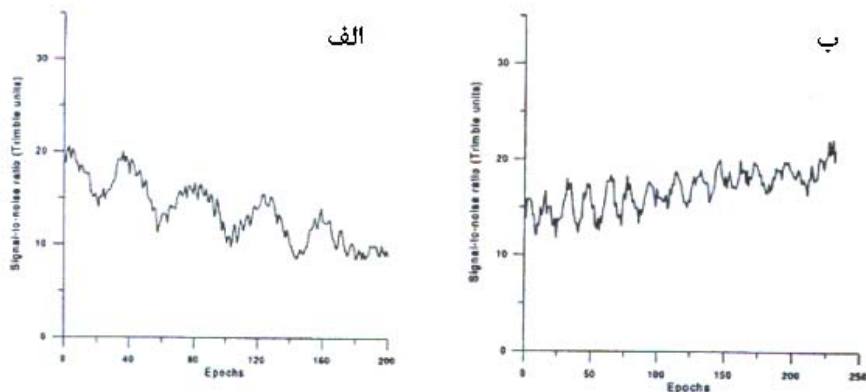
(۹) روش دیگر تشخیص خطای چندگانگی مسیر در اندازه‌گیری فاز، استفاده از نسبت سیگنال به نویز (SNR) می‌باشد که این نسبت در اغلب گیرنده‌ها ثبت می‌شود. نسبت سیگنال به نویز در اثر ساختار مقایسه‌گر، ویژگی بهره آنتن و چندگانگی تغییر می‌کند. در اغلب فرمت داده‌های GPS اطلاعات مربوط به نسبت سیگنال به نویز کنار گذاشته می‌شود و یا تنها برای نشان دادن اندازه‌گیری‌هایی بکار می‌رود که نسبت سیگنال به نویز آنها خیلی پایین و غیر قابل اعتماد باشند. برای این که نمونه‌هایی از نسبت سیگنال به نویز تجسم گردد، مقادیر آنها در شکل ۲ برای دو ماهواره با زاویه‌های ارتفاعی پایین نشان داده شده است.

۱۰) روش دیگر که اخیراً ارائه گردیده است براساس محاسبه یک تابع اتوکوریانس تجربی است که همبستگی خطای چندگانگی مسیر را نشان داده و به صورت ریاضی اثر آن را برمی‌دارد. اثر چندگانگی مسیر بستگی به هندسه ماهواره و گیرنده دارد و این دو به خاطر تغییر هندسه ماهواره و گیرنده در طول زمان، متغیر در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به تحقیقات انجام گرفته، بر روی داده‌های استاتیک بیشترین همبستگی به دست آمده برای شبه فاصله، حدود ۸۱ ثانیه و برای فاز موج حامل حداکثر ۱۵۸ ثانیه می‌باشد. در حالت کینماتیک به دلیل حرکت گیرنده انتظار می‌رود که این فواصل زمانی بسیار کوتاه باشند و نتیجتاً خطای چندگانگی در حالت کینماتیک کمتر از استاتیک در نظر گرفته می‌شود. برای یک آنتن متحرک در کارهای کینماتیک خطای چندگانگی مسیر به دلیل تغییرات سریع هندسه ماهواره‌ها و محیط اطراف گیرنده، تغییرات زیاد و زود هنگامی خواهد داشت. نتیجتاً برای کارهای کینماتیک می‌توان خطای چندگانگی مسیر را یک خطای اتفاقی در نظر گرفت. این خطا یکی از موانع جدی برای تعیین موقعیت دقیق در کارهای کینماتیک است زیرا ممکن است حل ابهام فاز را دچار مشکل نماید.

۱۱) در روش بعدی از تبدیلات موجک گسسته به عنوان ابزاری برای جداسازی چندگانگی مسیر از سیگنال استفاده می‌شود. سیگنال مورد استفاده مشاهدات تفاضلی مرتبه دوم فاز است (عاری از خطای ساعت ماهواره و گیرنده) که ورودی سیستم تبدیل موجک گسسته می‌باشد. با انجام تبدیل موجک گسسته در چند مرحله (بسته به طول اطلاعات) با استفاده از آنالیز MRA مشخصه چندگانگی مسیر در یک مقیاس خاص از تبدیل ظاهر می‌شود. با دوباره‌سازی سیگنال و قرار دادن فیلتر در مرحله‌ای که اثر چندگانگی مسیر مشاهده شده، می‌توان این اثر را تا حد زیادی کاهش داد یا حذف نمود.

۱۲) می‌دانیم که اثر خطای چندگانگی مسیر روی مشاهدات همانند اثر یونسفر وابسته به فرکانس است. به طوری که با فرکانس مشاهده نسبت معکوس دارد، به همین دلیل اثر آن روی مشاهدات کد بیشتر از مشاهدات فاز است. برای حل ابهام WADGPS، تأخیر یونسفری نقش مهمی بازی می‌کند و ما می‌توانیم جهت جداسازی نویز و چندگانگی مسیر از تأخیر یونسفری مشاهدات کد دو فرکانسه از تبدیلات موجک گسسته استفاده کنیم.

در این مقاله ما از اطلاعات موجود در سیگنال‌های چندگانگی مسیر برای آشکارسازی تغییر شکل‌ها استفاده خواهیم کرد. نکته قابل توجه در اینجا این است که اگر محیط نامتغیر باشد، هندسه مابین ماهواره‌های GPS و محل رفلکتور یک گیرنده خاص در هر روز نجومی تکرار می‌شود، لذا چندگانگی مسیر در روزهای متوالی طرح مشابهی را نشان می‌دهد که این روند تکراری می‌تواند ابزار مناسبی برای تحقیق در مورد وجود چندگانگی مسیر با آنالیز مشاهدات روزهای متوالی باشد، حال اگر ما چندگانگی مسیر را به طور عمده با استفاده از سطوح منعکس کننده ایجاد کنیم، تغییر شکل سطوح محیط اطراف را می‌توان با نگاه به تغییرات در اثر چندگانگی مسیر در روزهای مختلف نجومی آشکارسازی نمود. اصول اساسی تست و محاسبه تغییر شکل سطح با استفاده از سیگنال‌های چندگانگی مسیر در این مقاله مطرح خواهد شد. نتایج تست‌های مقدماتی نیز ارائه خواهد گردید.



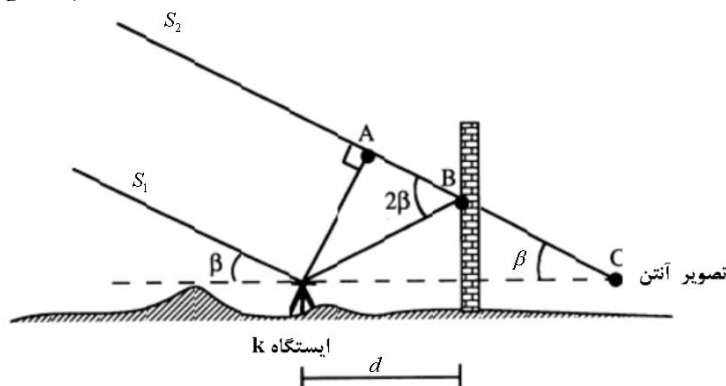
شکل ۲- نسبت سیگنال به نویز مشاهداتی: الف) برای ماهواره شماره ۱۱ ب) برای ماهواره شماره ۱۹. مقادیر نسبت سیگنال به نویز با واحد Trimble (AMU) نمایش داده شده‌اند.

۲- اصل آشکارسازی تغییر شکل با استفاده از سیگنال‌های چندگانگی مسیر

۲-۱- اثر چندگانگی مسیر GPS

سیگنال‌هایی که دچار چندگانگی مسیر می‌شوند، با کد و فاز حاملی که زمان انتشارشان با آنها متفاوت است، وارد گیرنده می‌شوند و در مقایسه با سیگنال‌هایی که مستقیماً وارد گیرنده می‌شوند، به علت طولانی شدن مسیر حرکت‌شان در اثر انعکاس همیشه تأخیر زمانی دارند. در گیرنده تلفیق سیگنال مستقیم و سیگنال انعکاس یافته مورد پردازش قرار می‌گیرد. اثر چندگانگی مسیر روی فاز حاصل را می‌توان برای سطوح معلوم برآورد نمود. شکل ۳ وضعیتی را نشان می‌دهد که سیگنال از روی یک سطح مسطح منعکس می‌شود. معادلات سیگنالی که مستقیماً از ماهواره می‌آید و سیگنالی که به طور غیر مستقیم از سطح منعکس کننده می‌آید را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} S_1 &= A \cos \Phi_D \\ S_2 &= \alpha A \cos(\Phi_D + \theta) \end{aligned} \quad (1)$$



شکل ۳- نمایش هندسه پدیده چندگانگی مسیر از مانع مسطح قائم

در شکل ۳، S_1 سیگنالی است که مستقیماً از ماهواره می‌آید و S_2 سیگنال غیرمستقیم از سطح منعکس کننده است.

دو سیگنال مستقیم و انعکاس یافته در مرکز آنتن تداخل می‌کنند و سیگنال ترکیبی که یا سیگنال جمعی به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} S &= S_1 + S_2 \\ &= A \cos \Phi_D + \alpha A \cos(\Phi_D + \theta) = \beta A \cos(\Phi_D + \psi) \end{aligned} \quad (2)$$

در روابط فوق داریم:

A : دامنه موج حامل

S_1 : دامنه موج حامل سیگنال مستقیم

$$(S_{1,\max} = A)$$

S_2 : دامنه موج حامل سیگنال انعکاس یافته

$$(S_{2,\max} = \alpha A)$$

S : دامنه موج حامل سیگنال تداخلی

α : ضریب میراثی سیگنال منعکس شده ($0 \leq \alpha \leq 1$)

به ازای $\alpha = 0$ بازتابی وجود ندارد و به ازای $\alpha = 1$ شدت سیگنال منعکس شده با شدت سیگنال مستقیم یکی است.

Φ_D : موقعیت فاز سیگنال مستقیم

θ : شیفت فاز سیگنال منعکس شده نسبت به فاز سیگنال مستقیم

βA : دامنه سیگنال تداخلی

ψ : شیفت فاز سیگنال تداخلی نسبت به سیگنال مستقیم یا تأخیر فاز (خطای چندگانگی مسیر فاز حامل مشاهداتی)

برای تعیین خطای چندگانگی مسیر فاز حامل مشاهداتی یعنی (ψ) و دامنه سیگنال تداخلی یعنی βA می‌توان به شرح زیر عمل کرد:

رابطه سیگنال تداخلی به کمک بسط مثلثاتی به شکل زیر در می‌آید:

$$\begin{aligned} S &= S_1 + S_2 \\ &= A \cos \Phi_D + \alpha A \cos(\Phi_D + \theta) = \beta A \cos(\Phi_D + \psi) \\ &A \cos \Phi_D + \alpha A \cos \Phi_D \cos \theta - \alpha A \sin \Phi_D \sin \theta \\ &= \beta A \cos \Phi_D \cos \psi - \beta A \sin \Phi_D \sin \psi \\ &A \cos \Phi_D (1 + \alpha \cos \theta) - \alpha A \sin \Phi_D \sin \theta \\ &= \beta A \cos \Phi_D \cos \psi - \beta A \sin \Phi_D \sin \psi \end{aligned} \quad (3)$$

برای اینکه رابطه فوق به ازای جميع مقادير ممكن Φ_D صدق کند بایستی ضرایب $\sin \Phi_D$ و $\cos \Phi_D$ دو طرف رابطه فوق مساوی هم باشند، یعنی:

$$A(1 + \alpha \cos \theta) = \beta A \cos \psi \quad (4)$$

$$\alpha A \sin \theta = \beta A \sin \psi \quad (5)$$

با رساندن به توان دو و جمع دو رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\beta = \sqrt{1 + 2\alpha \cos \theta + \alpha^2} \quad (6)$$

برای تعیین تأخیر فاز ψ ، با تقسیم دو رابطه اخیر بر هم خواهیم داشت:

$$\psi = \tan^{-1} \frac{\alpha \sin \theta}{1 + \alpha \cos \theta} \quad (7)$$

با توجه به شکل ۳ شیفت فاز (تأخیر فاز به علت چندگانگی مسیر) سیگنال منعکس شده را می‌توان از رابطه زیر بر حسب رادیان به دست آورد:

$$\begin{aligned} \theta_m &= 2d \cos \beta \\ \theta_{cycle} &= \frac{2d}{\lambda} \cos \beta \\ \theta_{rad} &= \frac{4\pi d}{\lambda} \cos \beta \end{aligned} \quad (8)$$

در رابطه فوق:

d : فاصله عمودی بین گیرنده و سطح منعکس کننده

λ : طول موج فاز حامل و

β : زاویه ارتفاعی ماهواره

می‌باشند. برای یک سطح معلوم خطای چندگانگی مسیر از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$S_{mult} = \frac{\psi}{2\pi} \lambda = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \sin \theta}{1 + \alpha \cos \theta} \right) \quad (9)$$

در حالتی که α ثابت است، ماگزیمم خطای فازی که می‌توان رسید $\pm 90^\circ$ است. این ماگزیمم خطا معادل $\lambda/4 \cong 4.8 \text{ cm}$ خواهد بود.

معادلات (۸) و (۹) نشان می‌دهند که اثر چندگانگی مسیر تابعی از عامل کاهش دامنه α و شیفت فاز θ سیگنال منعکس شده است. وقتی که α ثابت باشد، θ فقط به موقعیت نسبی بین آنتن و سطح منعکس کننده بستگی دارد. شکل ۴ تغییر اثر چندگانگی مسیر را با زاویه ارتفاعی ماهواره، β سیگنال و فاصله d ما بین آنتن و سطح منعکس کننده نشان می‌دهد.

از شکل ۴ می‌توان دید که اثر چندگانگی مسیر با تغییر زاویه ارتفاعی ماهواره تغییر می‌کند. تغییر فرکانس همچنین به فاصله d بستگی دارد. اگر سطح منعکس کننده حرکت کند یا تغییر شکل یابد اثر چندگانگی مسیر نیز تغییر خواهد کرد.

در عمل ممکن است سیگنال‌های چندگانگی مسیر زیادی به طور همزمان وجود داشته باشد در این حالت سیگنال ترکیبی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} S_0 &= S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \dots + S_n \\ &= S + S' = A_0 \cos(\varphi + \psi + \psi') \end{aligned} \quad (10)$$

و

$$\begin{aligned} S &= S_1 + S_2 = A' \cos(\varphi + \psi) \\ S' &= S_3 + S_4 + \dots + S_n = \alpha' A' \cos(\varphi + \psi') \end{aligned} \quad (11)$$

که $S_2, S_3, S_4, \dots, S_n$ سیگنال‌های چندگانگی مسیر از سطوح مختلف منعکس کننده بوده و ψ' تأخیر فاز ایجاد شده توسط S_3, S_4, \dots, S_n است. مشابه روابط (6) و (7)، دامنه سیگنال ترکیبی A_0 به صورت زیر است

$$A_0 = A' (1 + 2\alpha' \cos \theta' + \alpha'^2)^{1/2} \quad (12)$$

و تأخیر فاز حاصل ψ' ایجاد شده به وسیله S_3, S_4, S_n به صورت زیر است

$$\psi' = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha' \sin \theta'}{1 + \alpha' \cos \theta'} \right) \quad (13)$$

اثر چندگانگی مسیر را می‌توان به صورت زیر پیدا نمود

$$S_{mul} = \frac{\psi + \psi'}{2\pi} \lambda \quad (14)$$

اگر فقط سطح منعکس کننده S_1 تغییر شکل یابد، اثرات چندگانگی قبل و بعد از تغییر شکل به صورت زیر هستند.

$$S_{multi1} = \frac{\lambda}{2\pi} (\psi_1 + \psi') \quad (15)$$

$$S_{multi2} = \frac{\lambda}{2\pi} (\psi_2 + \psi')$$

که اندیس ۱ کمیت‌های قبل از تغییر شکل و اندیس ۲ کمیت‌های بعد از تغییر شکل را نشان می‌دهد.

تغییر ایجاد شده به وسیله تغییر شکل به صورت زیر است:

$$L = S_{multi2} - S_{multi1} = \frac{\lambda}{2\pi} (\psi_2 - \psi_1) \quad (16)$$

از معادلات (7) و (8)، به رابطه زیر می‌رسیم

$$\begin{aligned} \Delta\psi &= \psi_2 - \psi_1 \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \sin(\theta + \Delta\theta)}{1 + \alpha \cos(\theta + \Delta\theta)} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\alpha \sin \theta}{1 + \alpha \cos \theta} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

که در آن

$$\theta = \frac{4\pi d}{\lambda_1} \cos \beta \quad (18)$$

$$\Delta\theta = \frac{4\pi\delta d}{\lambda_1} \cos\beta \quad (19)$$

δd : حرکت سطح منعکس کننده نسبت به آنتن است، با انجام عملیات ریاضی زیر داریم:

$$\tan(\alpha - \beta) = \frac{\tan\alpha - \tan\beta}{1 + \tan\alpha \tan\beta} \quad \text{چون}$$

لذا خواهیم داشت:

$$\tan\Delta\psi = \tan(\psi_2 - \psi_1)$$

$$= \tan\left(\tan^{-1}\left(\frac{\alpha \sin(\theta + \Delta\theta)}{1 + \alpha \cos(\theta + \Delta\theta)}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\alpha \sin\theta}{1 + \alpha \cos\theta}\right)\right)$$

$$= \frac{\frac{\alpha \sin(\theta + \Delta\theta)}{1 + \alpha \cos(\theta + \Delta\theta)} - \frac{\alpha \sin\theta}{1 + \alpha \cos\theta}}{1 + \frac{\alpha \sin(\theta + \Delta\theta)}{1 + \alpha \cos(\theta + \Delta\theta)} \frac{\alpha \sin\theta}{1 + \alpha \cos\theta}}$$

$$= \frac{\alpha \sin(\theta + \Delta\theta)(1 + \alpha \cos\theta) - \alpha \sin\theta(1 + \alpha \cos(\theta + \Delta\theta))}{(1 + \alpha \cos(\theta + \Delta\theta))(1 + \alpha \cos\theta) + \alpha^2 \sin(\theta + \Delta\theta)\sin\theta}$$

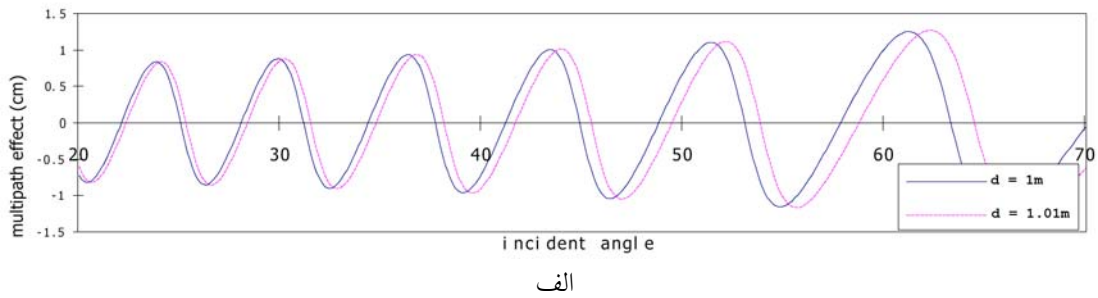
$$= \frac{\alpha(\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta) + \alpha^2 \sin(\Delta\theta)}{1 + \alpha(\cos(\theta + \Delta\theta) + \alpha \cos\theta) + \alpha^2 \cos(\theta + \Delta\theta - \theta)}$$

$$= \frac{\alpha(\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta) + \alpha^2 \sin(\Delta\theta)}{1 + \alpha(\cos(\theta + \Delta\theta) + \alpha \cos\theta) + \alpha^2 \cos(\Delta\theta)}$$

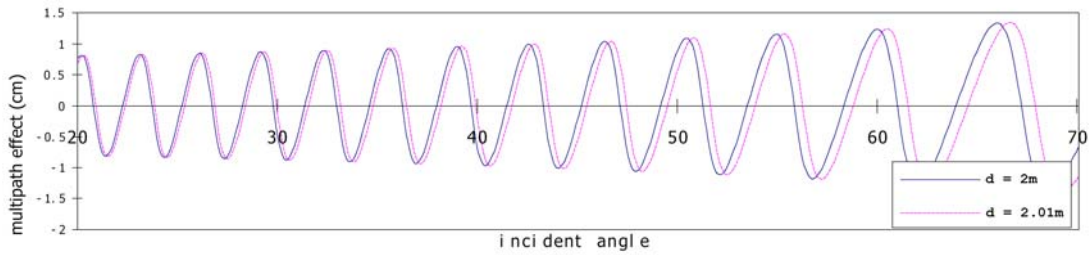
بنابراین

$$\Delta\psi = \tan^{-1}\left(\frac{\alpha(\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta) + \alpha^2 \sin\Delta\theta}{1 + \alpha(\cos(\theta + \Delta\theta) + \cos\theta) + \alpha^2 \cos\Delta\theta}\right) \quad (20)$$

معادلات (۱۶)، (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) رابطه ما بین تغییر در اثر چندگانگی مسیر و تغییر شکل یک سطح منعکس کننده را ارائه می دهند. به عنوان مثال شکل ۵ تغییر در خطای چندگانگی مسیر را وقتی که سطح منعکس کننده 5cm تغییر کند نشان می دهد.

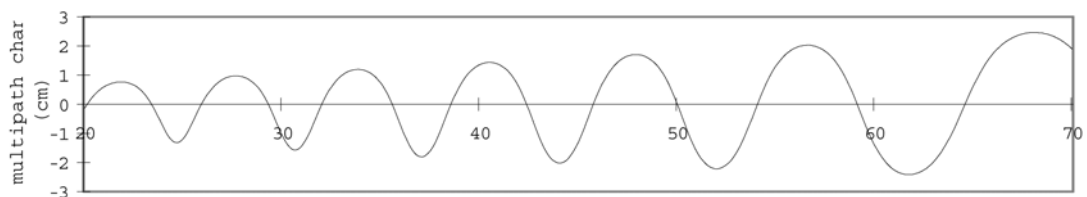


الف



ب

شکل ۴- تغییر اثر چندگانگی مسیر با زاویه ارتفاعی ماهواره



شکل ۵- تغییرات چندگانگی مسیر با زاویه ارتفاعی ماهواره ($d = 1m, \delta d = 5cm$)

۲-۲- آشکارسازی تغییر شکل با استفاده از سیگنال‌های چندگانگی مسیر

در عمل، می‌توان به یک سری از مشاهدات یا برآوردهای خطاهای چندگانگی مسیر $S_{multi1}(t_i)$ و $S_{multi2}(t_i)$ رسید. $S_{multi1}(t_i)$ خطای چندگانگی مسیر قبل از تغییر شکل و $S_{multi2}(t_i)$ خطای چندگانگی مسیر بعد از تغییر شکل و t_i مبدا زمان است. مطابق رابطه (۱۶)، تغییر در خطای چندگانگی مسیر $L(t_i)$ که توسط تغییر شکل سطح منعکس کننده ایجاد می‌شود به صورت زیر است:

$$L(t_i) = S_{multi2}(t_i) - S_{multi1}(t_i + nS) \quad (21)$$

که n تعداد روزهای نجومی ما بین دو دوره مشاهداتی و δ فاصله زمانی ما بین یک روز متوسط نجومی و پریود مداری یک ماهواره است (حدود 3 دقیقه و 56 ثانیه، جداول 2، 3 و 4). تحت فرض نرمال بودن خطاهای مشاهداتی GPS داریم:

$$L(t) = E(L(t)) + \varepsilon(t) \quad (22)$$

$$\varepsilon(t) \sim N(0, \sigma^2)$$

با استفاده از روابط (۱۶)، (۲۰) و (۲۲) خواهیم داشت:

$$E(L(t)) = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\alpha(\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta) - \sin\theta + \alpha^2 \sin\Delta\theta}{1 + \alpha(\cos(\theta + \Delta\theta) + \cos\theta) + \alpha^2 \cos\Delta\theta} \right) \quad (23)$$

اگر $\Delta d = 0$ باشد، یعنی تغییر شکل نداشته باشیم:

$$E(L(t)) \equiv 0$$

بر مبنای بحث فوق، آنالیز را می‌توان به دو بخش تقسیم نمود. بخش اول تست این که آیا تغییر شکل مهم است یا نه. دوم تعیین مقدار تغییر شکل اگر تست فرض، تغییر شکل مهمی را نشان دهد. در مرحله نخست، می‌توانیم فرض صفر را به این صورت در نظر بگیریم:

$$H_0 : E(L(t)) \equiv 0$$

و فرض جانشین

$$H_1 : E(L(t)) \neq 0$$

تحت فرض صفر داریم

$$T = \frac{\sum_i L(t_i)L(t_i)}{n\sigma^2} \sim \chi^2(n) \quad (24)$$

برای سطح اطمینان $(1 - \alpha)$ ،

$$T < \chi_{\alpha}^2(n) \quad (25)$$

در کاربردهای عملی، σ معمولاً مجهول است و بر مبنای تست‌هایی که تغییری در محیط اطراف گیرنده وجود ندارد، با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_i L(t_i)L(t_i)}{n} \quad (26)$$

و

$$T = \frac{\sum_i L(t_i)L(t_i)}{n_2 \hat{\sigma}^2} \sim F(n_1, n_2) \quad (27)$$

$$T < f_{\alpha}(n_1, n_2) \quad (28)$$

مرحله دوم، استفاده از روش کمترین مربعات برای پیدا کردن مقدار تغییر شکل است. از معادلات (۲۲) و (۲۳)، داریم

$$L(t_i) + v_i = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\alpha(\sin(\theta + \Delta\theta) - \sin\theta) + \alpha^2 \sin\Delta\theta}{1 + \alpha(\cos(\theta + \Delta\theta) + \cos\theta) + \alpha^2 \cos\Delta\theta} \right) \quad (29)$$

بر مبنای اصل کمترین مربعات یعنی

$$\phi = \sum v_i^T v_i = \min \quad (30)$$

می توان مقدار تغییر شکل را تعیین کرد.

۳- آزمایشات

برای تأیید مفاهیم مطرح شده یک سری آزمایشات انجام شد. محل تست‌ها در پشت بام یک ساختمان قرار داشت. برای انجام آزمایشات یک طول مبنای 38.901m ایجاد و برای تست‌ها استفاده شد. جمع‌آوری مشاهدات حدود هفت روز طول کشید (جدول ۱).

سطح منعکس کننده سطح همواری انتخاب و کاملاً نزدیک به آنتن قرار داده شد. اشکال ۶ و ۷ باقیمانده‌های یک ماهواره را در دو زمان نشان می‌دهد. چون در این آزمایشات طول مبنا خیلی کوتاه بوده و حدود سه ساعت مشاهده در حل طول مبنا استفاده شده است، پس باقیمانده‌های به دست آمده اکثراً مربوط به اثر چندگانگی مسیر و نویز تصادفی مشاهدات است. از مقایسه دو شکل دیده می‌شود که اثر چندگانگی مسیر کاملاً آشکار است و تغییر شکل سطح منعکس کننده را می‌توان با مطالعه باقیمانده‌ها آشکارسازی نمود.

تغییرات در باقیمانده‌های محاسبه شده برای برخی حالت‌های دیگر در اشکال ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

از بحث بالا می‌توان دید، این خاصیت که مدار ماهواره‌های GPS در هر روز متوسط نجومی تکرار می‌شود، برای آنالیز تغییر شکل‌ها با استفاده از خطای چندگانگی مسیر مهم است. زمانی که طول می‌کشد تا هر ماهواره GPS مدار خودش را تکرار کند از بقیه ماهواره‌ها اندکی متفاوت است (جدول ۲) [۴]. این نکته در آزمایشات انجام شده نیز دیده می‌شود (جداول ۳ و ۴). چون بازه نمونه‌برداری ۱۵ ثانیه انتخاب شد لذا تا ۱۵ ثانیه خطا برای مشاهدات امکان دارد. مقادیر استفاده شده در محاسبات ما به ترتیب برابر 240s، 225s، 255s و 240s برای ماهواره‌های شماره ۲۱، ۲۵، ۲۹ و ۳۰ هستند.

با استفاده از رابطه (۲۱)، می‌توان تغییرات $L(t)$ ناشی از تغییر شکل سطح منعکس کننده را به صورت زیر محاسبه نمود،

$$L(t) = V_2(t) - V_1(t + n\delta) \quad (31)$$

در رابطه فوق $V_1(t)$ و $V_2(t)$ به ترتیب باقیمانده‌های دو روز مورد نظر را مشخص می‌کنند. در اینجا ماهواره شماره ۲۵ را به عنوان مثال در نظر می‌گیریم. برای این ماهواره $\delta = 240s$ است. تغییرات بین آزمایشات ۲ و ۳، ۳ و ۴، ۴ و ۵ را می‌توان با روابط زیر محاسبه نمود،

$$L(t) = V_2(t) - V_1(t + 240s) \quad \text{برای آزمایشات ۲ و ۳، ۳ و ۴، ۴ و ۵}$$

$$L(t) = V_2(t) - V_1(t + 480s) \quad \text{برای آزمایشات ۲ و ۴}$$

با استفاده از رابطه (۲۶) $\hat{\sigma}^2$ را محاسبه می‌کنیم. با استفاده از آزمایشات ۱ و ۷ داریم

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_i L(t_i)L(t_i)}{n} = \frac{7531}{660} = 3.3780^2$$

آماره T را می‌توان مستقیماً با استفاده از رابطه (۲۷) به دست آورد. برای فاصله اطمینان $(1-\alpha)(\alpha=0.005)$ مقدار بحرانی $F_{0.005}(n_1, n_2) < 1.43$ است. در جدول ۵ آماره‌ها محاسبه شده و مقادیر بحرانی تست‌ها فهرست شده است.

نتایج جدول ۵ نشان می‌دهند که تغییر شکل‌ها در آزمایشات قابل توجه هستند. در آزمایشات ۶ و ۷، تغییرات مهمی در خطاهای چندگانگی مسیر وجود ندارد.

به منظور پیدا کردن مقادیر تغییر شکل‌ها، ما نیاز به تعیین پارامترهای تابع ϕ داریم. در روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) کمیت‌های مجهول عبارتند از: α ، d ، δd و β . زاویه ارتفاعی ماهواره β تابعی از زمان (t) است. فرض کنید

$$\beta = b_0 + b_1(t - t_0)^2 + b_2(t - t_0)^3 + b_3(t - t_0)^4 \quad (32)$$

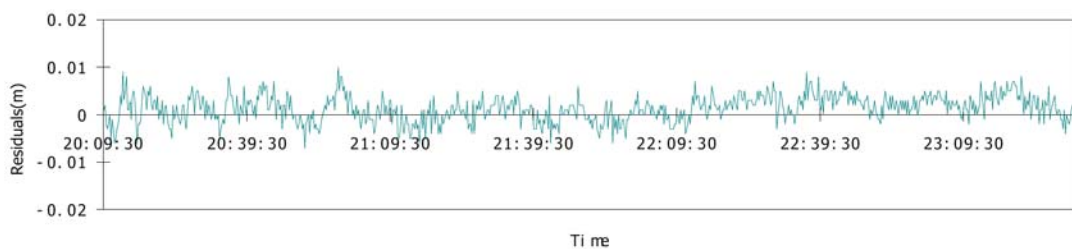
پارامترهای مجهول شامل $b_0, b_1, b_2, b_3, d, \delta d, \alpha$ است. به کمک تکنیک جستجوی بهینه‌سازی غیر خطی می‌توان جواب رابطه (۳۰) را پیدا کرد. نتایج در جدول شماره ۶ فهرست شده‌اند.

از طرح آزمایشات می‌دانیم که $d_1 = d_3$ ، $d_2 = d_1 + \delta d_1$ ، $\delta d_1 + \delta d_2 = \delta d_3$ و از جدول ۶ داریم، $d_1 = 0.666m$ و $d_3 = 0.670m$ و تفاضل $-0.004m = -4mm = 0.670 - 0.666$ است. همچنین، $d_2 = 0.729$ ، $d_1 + \delta d_1 = 0.666 + 0.051 = 0.717$ ، تفاضل $0.012m$ است.

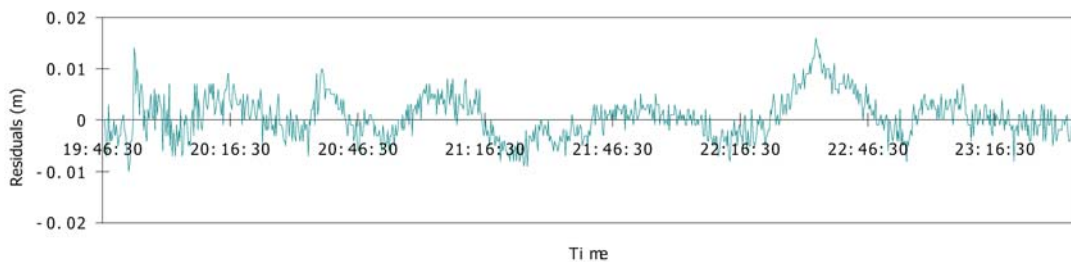
علاوه بر این $\delta d_1 + \delta d_2 = 0.051 + 0.028 = 0.079$ و $\delta d_3 = 0.081$ ، تفاضل $0.002m(2mm)$ است. این نتایج نشان می‌دهند که محاسبات در حد معقولی صحیح می‌باشند. منحنی رگرسیون و مشاهدات در اشکال ۱۲ و ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده‌اند.

روش محاسباتی بالا فقط برای حرکت یا انتقال سطح مناسب است و حل تغییر شکل‌های دورانی نیاز به مطالعات بیشتری دارد.

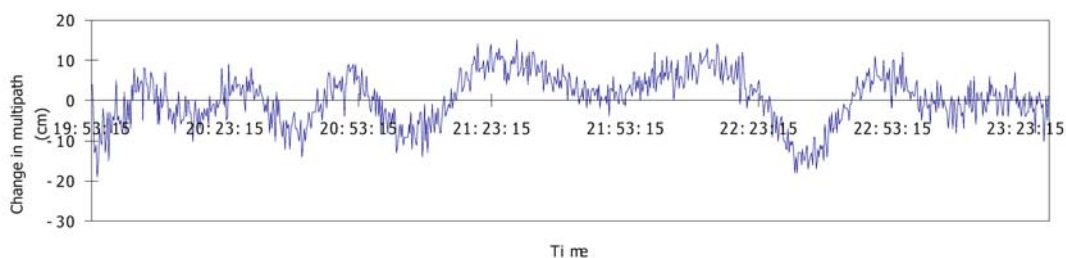
در این مقاله، $\beta(t)$ به شکل رابطه (۳۲) انتخاب شد که این فقط برای برخی مثال‌ها مناسب است و انتخاب صحیح این تابع نیز به مطالعات بیشتری نیاز دارد.



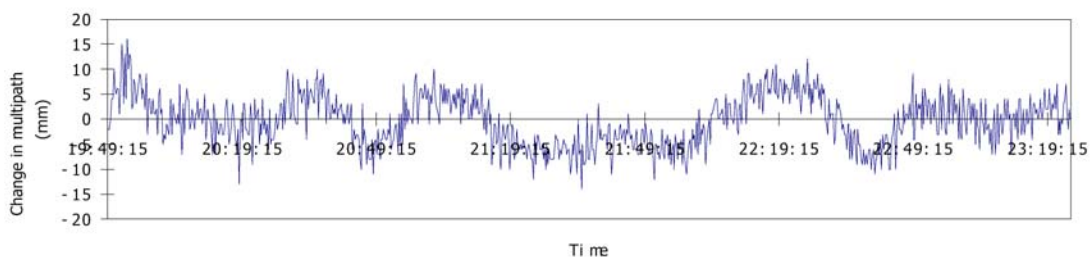
شکل ۶- باقیمانده‌های ماهواره شماره ۲۵ (۲۰۰۲/۰۷/۰۳)



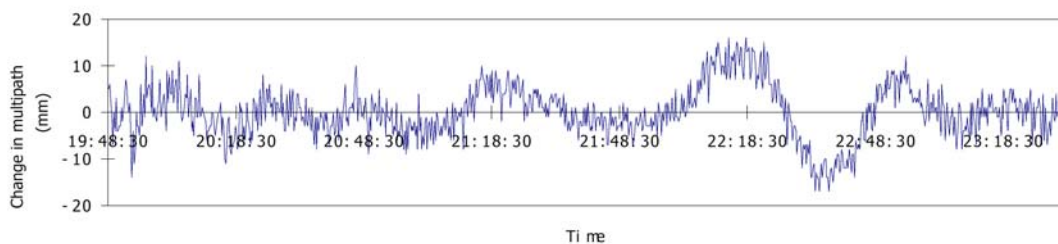
شکل ۷- باقیمانده‌های ماهواره‌ شماره ۲۵ (۲۰۰۲/۰۷/۰۸)



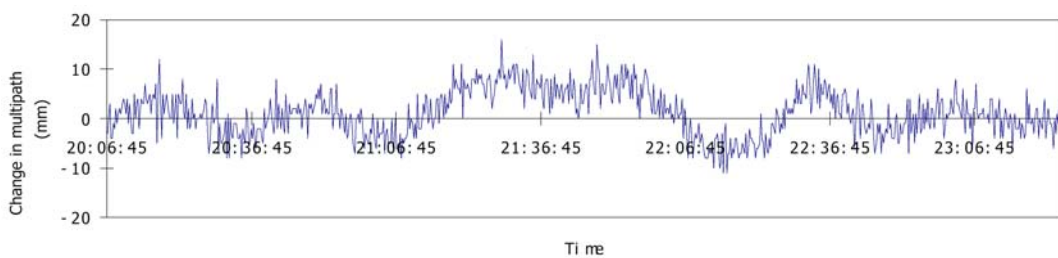
شکل ۸- تغییر در خطای چندگانگی مسیر ایجاد شده به وسیله $\delta d = 5 \text{ cm}$



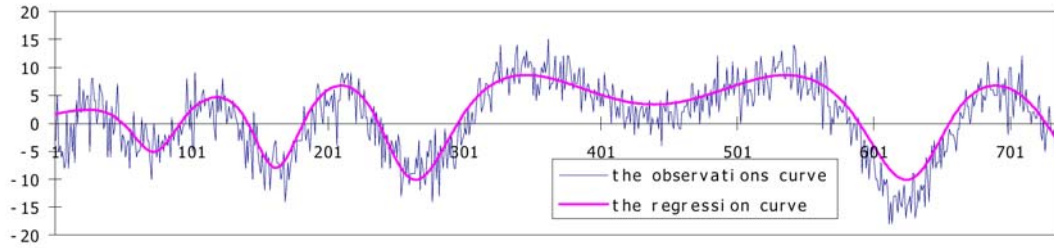
شکل ۹- تغییر در خطای چندگانگی مسیر ایجاد شده به وسیله $\delta d = 2.5 \text{ cm}$



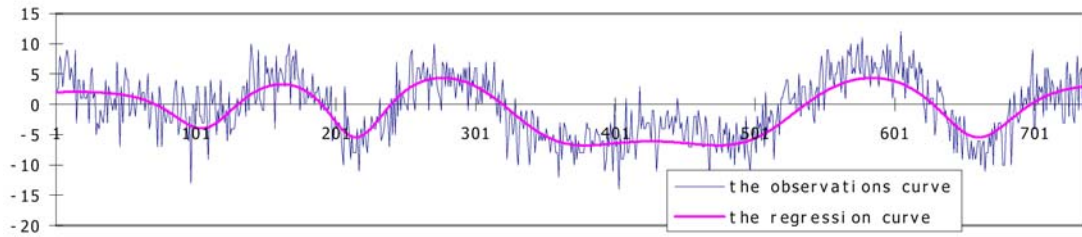
شکل ۱۰- تغییر در خطای چندگانگی مسیر ایجاد شده به وسیله $\delta d = 7.5 \text{ cm}$



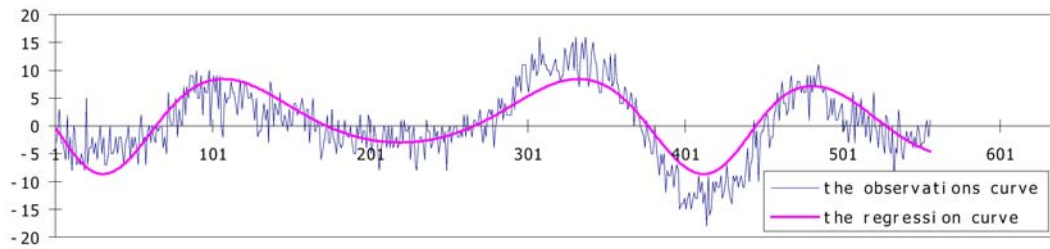
شکل ۱۱- تغییر در خطای چندگانگی مسیر ایجاد شده به وسیله زاویه دوران 3.2°



شکل ۱۲- مقایسه مشاهدات و منحنی رگرسیون (بین آزمایشات ۲ و ۳)



شکل ۱۳- مقایسه مشاهدات و منحنی رگرسیون (بین آزمایشات ۳ و ۴)



شکل ۱۴- مقایسه مشاهدات و منحنی رگرسیون (بین آزمایشات ۲ و ۴)

جدول ۱- آزمایشات انجام شده

آزمایش	تاریخ	زمان	توضیح
۱	۳ ژوئیه ۲۰۰۲	۲۰:۰۹-۲۳:۳۴	بدون سطح منعکس کننده انجام شد
۲	۸ ژوئیه ۲۰۰۲	۱۹:۴۶-۲۳:۳۶	یک سطح منعکس کننده اضافه شد
۳	۹ ژوئیه ۲۰۰۲	۱۹:۴۹-۲۳:۲۵	سطح منعکس کننده ۵ cm جابجا شد
۴	۱۰ ژوئیه ۲۰۰۲	۱۹:۴۰-۲۳:۲۵	سطح منعکس کننده آزمایش ۳، ۲/۵ cm جابجا شد
۵	۱۱ ژوئیه ۲۰۰۲	۲۰:۰۲-۲۳:۲۶	سطح منعکس کننده ۳/۵ درجه دوران داده شد
۶	۱۲ ژوئیه ۲۰۰۲	۱۹:۲۹-۲۳:۲۵	مشابه آزمایش ۵ عمل شد
۷	۱۳ ژوئیه ۲۰۰۲	۱۹:۳۹-۲۳:۱۴	مشابه آزمایش ۱ عمل شد

جدول ۲- تفاوت زمان روز نجومی [۴]

ماهواره	۲۱	۲۵	۲۹	۳۰
تفاوت زمان روز δ	۲۴۶ s	۲۴۲ s	۲۵۶ s	۲۵۰ s

جدول ۳- تفاوت زمان روز نجومی آزمایشات ۱ و ۷

ماهواره	۲۱	۲۵	۲۹	۳۰
تفاوت زمان روز δ	۲۴۴/۵ s	۲۳۴ s	۲۵۵ s	۲۴۴/۵ s

جدول ۴- تفاوت زمان روز نجومی آزمایشات ۵ و ۶

ماهواره	۲۱	۲۵	۲۹	۳۰
تفاوت زمان روز δ	۲۴۰ s	۲۲۵ s	۲۵۵ s	۲۴۰ s

جدول ۵- تست‌های فرض برای تغییر شکل‌ها

آزمایش‌ها	۳ و ۲	۴ و ۳	۴ و ۲	۵ و ۴
تعداد مبدأهای زمانی	۸۶۱	۸۶۱	۸۹۷	۷۹۴
T	۳/۴۷۹۸	۲/۱۵۶۰	۲/۷۰۳۱	۱/۹۹۶۹
$F_{0.005}(n1, 660)$	<۱/۴۳	<۱/۴۳	<۱/۴۳	<۱/۴۳

جدول ۶- تغییر شکل‌ها و دیگر پارامترهای برآورد شده

σ	b_3	b_2	b_1	b_0	t_0	δd	d	α	
۳/۳۳	۰/۰۲۹۵۰	۰/۰۱۴۰۴	-۰/۲۲۲۱	۰/۶۱۷۱	۱/۸۳۵۶	۰/۰۵۱	۰/۶۶۶	۰/۲۰۰۳	بین ۲ و ۳
۳/۱۷	۰/۰۴۵۰۶	۰/۰۱۶۰۴	-۰/۲۲۴۲	۰/۶۲۲۵	۱/۷۸۰۴	۰/۰۲۸	۰/۷۲۹	۰/۱۸۷۳	بین ۳ و ۴
۳/۵۹	۰/۰۴۸۵۴	۰/۰۰۴۵۴	-۰/۲۳۰۵	۰/۶۱۳۴	۰/۹۲۶۶	۰/۰۸۱	۰/۶۷۰	۰/۱۴۴۷	بین ۲ و ۴

۴- نتایج

سیگنال‌های چندگانگی مسیر به تغییر محیط اطراف گیرنده GPS خیلی حساس هستند بنابراین جهت آشکارسازی تغییر شکل سطوح منعکس کننده اطراف گیرنده می‌توان از این سیگنال‌ها استفاده نمود. آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های خیلی کوچک را نیز می‌توان با استفاده از سیگنال‌های چندگانگی مسیر آشکارسازی نمود.

آنالیز تغییر شکل بر اساس سیگنال‌های چندگانگی مسیر را می‌توان به دو مرحله تقسیم نمود. مرحله اول تست آماری اهمیت تغییر شکل و مرحله دوم محاسبه تغییر شکل است.

مراجع

- [1] Hofmann-Wellenhof, B. Lichtenegger, H. and Collins, J. (1997), GPS Theory and Practice, Springer Wien New York.
- [2] Leick, A. (1995), GPS Satellite Surveying, Wiley, New York.
- [3] Rast Boud, A. (2001), Detection and Solution of GPS Cycle Slip with Wavelet Transforms and Comparison with Kalman Filtering, M.Sc. Thesis in Geodesy, Tehran, Iran.

[4] Seeber, G. Menge, F., Volksen, C. (1997) Precise GPS positioning improvements by reducing antenna and site dependent effects. *Advances in Positioning and Reference Frames*, IAG Symposium Vol.118, pp. 237-244.