نشربه علمي مهندسي فناوري اطلاعات مكاني

سال یازدهم، شماره نخست، بهار ۱۴۰۲ Vol.11, No.1, Spring 2023 ۲۵– ۲۷

مقاله پژوهشی DOR: <u>20.1001.1.20089635.1402.11.1.3.4</u>



فیلتر سریهای زمانی تداخلسنجی راداری با استفاده از آنالیز ماتریس نویز کمترین مربعات تکمتغیره

محسن زینل پور'، حمید مهرابی^{۳*} ، علیرضا امیری سیمکویی^۳

۱- کارشناس ارشد ژئودزی، گروه مهندسی نقشهبرداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

۲- استادیار گروه مهندسی نقشهبرداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

۳- استاد گروه مهندسی نقشهبرداری، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

چکیدہ

زندگی بشر همواره متأثر از حوادث طبیعی مختلف مانند زلزله، فوران آتشفشان، فرونشست و غیره میباشد. یکی از ابزارهای مناسب جهت بررسی و تحلیل این حوادث، تداخل سنجی راداری با روزنه مصنوعی است. این تکنیک به عنوان یک روش ژئودتیک، با استفاده از اختلاف فاز میان تصاویر راداری، قادر به شناسایی جابهجایی پوسته زمین و آنالیز تغییر شکل میباشد. از مهمترین مزایای آن میتوان به سرعت بالای دسترسی به اطلاعات و قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا اشاره نمود. همانند سایر روشهای ژئودتیک، دقت بالا در این تکنیک به مدل سازی آشفتگیها و نویزهای موجود در مشاهدات وابسته است. علیرغم پیشرفت در دهههای اخیر، این آشفتگیها کمتر مورد توجه قرار گرفتهاند. منطقه مطالعاتی در این پژوهش، شمال غرب جزیره هاوایی میباشد. در این مطالعه فیلتر و کاهش آشفتگیها کمتر مورد توجه قرار گرفتهاند. مبنای مناسب ترین مدل تابعی و مدل آماری انجام میشود. مدل تابعی و مدل آماری مناسب با استفاده از آزمون بیشینه درست مای رامانی بر میبای مناسب ترین مدل تابعی و مدل آماری انجام میشود. مدل تابعی و مدل آماری مناسب با استفاده از آزمون بیشینه درست مای (MLE) تشخیص داده میشود. مدلهای تابعی بررسیشده در این مطالعه شامل ترند، مولفههای متناوب و پرشهای موجود در سریهای زمانی می باشند. مدلهای آماری نیز شامل نویز سفید، فلیکر و رندومواک هستند که مولفههای آنها با استفاده از روش آنالیز نویز کمترین مربعات تمخیص داده می شود. سریای نیز شامل نویز سفید، فلیکر و رندومواک هستند که مولفههای آنها با استفاده از روش آنالیز نویز کمترین مربعات می باشند. مدلهای آماری نیز شامل نویز سفید، فلیکر و رندومواک هستند که مولفههای آنها با استفاده از روش آنالیز نویز کمترین مربعات می باشند. مدل های آماری نیز شامل نویز سفید، فلیکر و رندومواک هستند که مولفههای آنها با تعاده از روش آنالیز نویز کمترین مربعات می باشند. مدل های آماری نیز شامل نویز سفیده این با ستفاده از مناسب ترین مدل بای می استی می ورش آنالیز نویز معرین مدل برای تمامی پیکساها، ترند خطی با حضور مولفههای مالاگذر و پایینگذر با یکدیگر مقایسه میشوند. پس از اعمال روش آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره، به طور مینگین صحت نتایج به میزان ۳۳٪ بهبود یافت درحالی که بهبود حاصل از اعمال فیلترهای بالاگذر و پایینگذر به طور میانگین ۲۸٪ می باشد.

کلید واژهها : سریهای زمانی تداخلسنجی راداری، آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره، فیلترهای بالاگذر و پایین گذر.

[ً] نویسنده مکاتبه کننده: اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده عمران و حمل ونقل، گروه مهندسی نقشهبرداری. تلفن: ۳۱۳۷۹۳۵۲۹۷

۱– مقدمه

امروزه با توجه به تأثیرات حوادث طبیعی بر زندگی بشر و خسارات ناشی از آنها، نیاز مبرم به کسب اطلاعات در زمینه پدیدههایی از قبیل فرونشست، آتشفشانها، رانش زمین، زلزله و ... میباشد. سریهای زمانی به دلیل امکان بررسی و تحلیل تغییرات در گذر زمان و همچنین برآورد پارامترهایی همانند تغییرات سرعت و شتاب، کمک بسزایی به بررسی این پدیدهها مینمایند. امروزه تداخل سنجى رادارى با روزنه مصنوعي (InSAR¹) یکی از تکنیکهای کاربردی جهت آنالیز تغییر شکل زمین میباشد. از مزایای این تکنیک می توان به سرعت بالای دسترسی به اطلاعات، فراوانی و پراکندگی مشاهدات، عدم محدودیت در طول شبانهروز و ... اشاره نمود. کارایی سریهای زمانی تداخلسنجی راداری وابسته به کاهش اثر نویزهای موجود در آنها است[۱ و ۲] و این امر می تواند به افزایش دقت در برآورد میدان جابجایی کمک کند. به رغم پیشرفتهای اخیر در سریهای زمانی، مدلسازی نویزهای موجود در این تکنیک کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

از اثرات و نویزهای موجود در هر پیکسل از تـداخلنما می توان به تـاخیر اتمسفری، خطـای مـداری، خطـای بازیابی فاز، خطـای ناشـی از ناهمبسـتگیهـا^۲، خطـای باقیمانده توپوگرافی اشاره نمود. تاخیر اتمسفری همواره به عنوان یکـی از منـابع اصـلی نـویز در نتـایج تصـاویر راداری شناخته میشود. در این راستا مطالعات مختلفی به بررسی لایههای یونسفر و تروپوسفر پرداختهاند[۱، ۳ و ۴]. از آنجاکه یونسفر محیطـی تجزیـهگـر^۳ دارد و بـه فرکانس امواج وابسته میباشـد، بیشـترین تـاثیر آن بـر باندهای با فرکانس پایینتر همانند *L* و ۲ مـیباشـد[۳].

الكتروني كلى (*TEC) و ارتباط آن با نتايج (MAI)، اقدام به محاسبه تاخیر یونسفری نمودهاند[۳]. از سوی دیگر در برخی مطالعات با استفاده از مدل های هواشناسی و استخراج پارامترهایی از قبیل بخار آب و دما، اقدام به مدل سازی تاخیر تروپوسفری نمودهاند [۴]. منبع دیگر تاثیر گذار بر نتایج، خطای بازیابی فاز می باشد [۵]. یانجان و همکاران (۲۰۱۹) با استفاده از روش جستوجوی پل⁶، خطاهای بازیابی فاز را در بعد مکان شناسایی و حذف نمودهاند. در این مطالعه همچنین با استفاده از بست فاز^۷ در دامنـه زمـان، ایـن خطاها کاهش می یابند [۶]. بیگز و همکاران (۲۰۰۷) پس از بازیابی فاز با استفاده از الگوریتم سنتی برش شاخه^[٧]، بر اساس شبکهای از تداخلنماها، اقدام به کاهش خطای بازیابی فاز در دامنه زمان نمودهاند[۸]. حسین و همکاران (۲۰۱۶) خطای بازیابی فاز را با استفاده از بست فاز در دامنه زمان تشخیص و کاستهاند [۹ و ۱۰]. از دیگر عوامل تاثیر گذار بر سری های زمانی تداخل سنجی راداری، نویز ناشی از ناهمبستگیها میباشد. دقت تداخلنماها همواره تحت تاثیر عواملی از جمله: ناهمبستگیهای زمانی و مکانی، تغییــر زوایـای تصـویربرداری و ... مــیباشــد. ناهمبستگیهای زمانی، ناشی از عواملی همچون تغییر خصوصیات بازپراکنشی سطح زمین در گذر زمان میباشد[۲ و ۱۱]. نویز ناشی از ناهمبسـتگیهـا در هـر تداخل نما مستقل است[۱۲] و در برخی از مطالعات، از مدل نویز سفید[۱] و در برخی دیگر با ارائه سایر مدل های آماری، سعی در کاهش این اثر شده است [۲ و ۶]. با توجه به وجـود باقیمانـده خطـای توپـوگرافی در تداخل نماها، مطالعات مختلفی به بررسی این اثر

¹ Interferometric synthetic aperture radar

² Decorrelation

³ Dispersive

^{*} Total Electron Content

^a Multi Aperture Interferometry

⁶ Bridging

⁷ Phase closure

⁸ Branch cut

پرداختهاند [۱۳ و ۱۴]. سمسانوف و همکاران (۲۰۱۰) بوسیلهی روش پشتهبندی این اثر را کاهش دادهاند [۱۳]. از دیگر منابع خطای بررسی شده می توان به خطای مدار ماهواره اشاره نمود. هانسن (۲۰۰۱) با برازش توابع چندجملهای و هموارسازی مشاهدات، اقدام به کاهش این اثر نموده است [۱۴].

با پیشرفت روزافزون ماموریتهای تداخل سنجی راداری و کوتاهترشدن دوره تناوب تصاویر، امکان بررسی تغییرات تدریجی در راستای زمان با ترکیب چندین تداخل نما فراهم شده است[۲]. سریهای زمانی با ترکیب چندین تداخلنما امکان غلبه بر ناهمبستگیها و آشفتگیها را فراهم میسازند. تولید سریهای زمانی تداخل سنجی راداری در قالب حل مساله معکوس انجام می گیرد. مسئله معکوس در این مبحـث، دسـتیابی بـه سری های زمانی تداخل سنجی راداری سرشکن شده با استفاده از مشاهدات تفاضلي تداخل نماها مي باشد كه به دو شیوه یا صلی ۱- طول مبنای کوتاه ('SBAS) ۲-یــراکنش گرهـای دائمـی (PS-InSAR^۲) انجـام می شود[۱۰]. در ایـن دو روش تمـامی تـداخل نماهـای ممکن، با اعمال قیود مختلف با هدف دستیابی به سریهای زمانی تولید میشوند. این قیود در روش طول مبنای کوتاه، کوتاه بودن طول مبنای مکانی و زمانی می باشد و این امر موجب تشکیل شبکهای گسترده، شامل تصاویر پایه^۳ متعدد مے شود [۱۰]. قیود اعمال شده در روش پراکنش گرهای دائمی، پایداری خصوصیات پیکسلهای منتخب میباشد. در این صورت شبکهای با یک تصویر پایه تشکیل می شود و پیکسل های منتخب در امر تولید سری های زمانی شرکت داده می شوند. با به کار گیری این دو روش، در نهایت سریهای زمانی اختلاف فاز و جابه جایی در

۳۹

راستای دید ماهواره تولید می گردند. امروزه در سریهای زمانی تداخلسنجی راداری، اثرات اتمسفر برآورد و از مشاهدات کاسته می شود. باقیمانده این اثر در قالب نویز در سریهای زمانی مشاهده می گردد. وجود نویزهای مختلف همواره در نتایج سریهای زمانی موثر بوده است [۱۵ و ۱۶].

در الگوریتمهای معمول طول مبنای کوتاه و پراکنش گرهای دائمی، نویزهای موجود پس از حذف اثرات مختلف با اعمال فلیترهای مکانی-زمانی کاهش مییابند[۱۶ و ۱۷]. از نقاط ضعف فیلترهای مکانی و زمانی میتوان به موارد ذیل اشاره کرد:۱- برخی از این فیلترها نیازمند مدل جابه جایی منطقه هستند[۱]. ۲-وزندهی پیکسلها همواره از موارد چالش برانگیز در روند این نوع از فیلترها بوده است. برای مثال در برخی از فیلترها، وزندهای با ده است. برای مثال در برخی میباشد[۵]. ۳- تعیین طول پنجره فیلتر در دقت نتایج تاثیر مستقیم دارد[۱].

در سالیان اخیر با به کارگیری تصحیحات خارجی از قبیل: اطلاعات هواشناسی [۴] و مدلهای آماری [۱ و ۲] سعی در کاهش اثر اتمسفر شده است. خطای برآورد شده با استفاده از اطلاعات هواشناسی وابستگی شدیدی به مشاهدات در لحظهی تصویربرداری دارد [۶]. کاهش نویز با استفاده از مدلهای آماری نیز بر اساس ویژگیهای منابع موثر در تداخلنماها انجام میشود. برای مثال در برخی از مدلهای آماری از همبستگی نویز اتمسفر استفاده میشود [۱]. نبود اطلاعات در مورد تمامی منابع نویز و ویژگی رفتاری آنها موجب میشود.

یکی از روشهای آنالیز نویز سریهای زمانی، آنالیز نویز کمترین مربعات میباشد[۱۸ و ۱۹]. امیری سیمکویی و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از آنالیز نویز چندمتغیره، سریهای زمانی مختصات ایستگاههای دائمی

DOI: 10.61186/jgit.11.1.37

[\] Small Baseline Subset

^r Persistent Scatterer InSAR

[&]quot; Master

⁴ Gaussian distribution

سامانه های ماهواره ای ناوبری جهانی (GNSS) را به صورت همزمان مورد ارزیابی قرار دادهاند. در این روش با برآورد همزمان مولفههای نویز زمانی و مکانی، امکان ساخت یک ماتریس نویز چندمتغیره واقع بینانه فراهم می شود [۲۰]. از نمونه های کاربرد آنالیز نویز کمترین مربعات، می توان به بر آورد ماتریس نویز مناسب سـرىهـاى ايسـتگاههـاى دائمـى *GNSS* اشـاره نمـود. سریهای قابل استخراج از هر ایستگاه شامل سه سری زمانی در راستای مولفههای مختصات میاشد. تشخیص نویز در این سری ها با بررسی همبستگی زمانی در طی سری زمانی یک مولفه مختصات در هـر ایستگاه و همبستگی زمانی و مکانی بین سریها پیادہسازی میشود. آنالیز نویز کمترین مربعات یکے از ابزارهای مناسب جهت آنالیز نویز سری های زمانی با شرکت دادن این همبستگیها میباشد [۱۸ و ۱۹]. این آنالیز به دو روش تکمتغیره^۲ و چندمتغیره^۳ قابل انجام است. در آنالیز نویز تکمتغیره، تنها همبسـتگی زمـانی مشاهدات در یک سری زمانی در آنالیز نویز دخالت داده می شود. در این روش هر کدام از سری ها به صورت مستقل از همدیگر مورد تحلیل قرار می گیرنـد. ایـن در حالی است که در آنالیز نویز چندمتغیره، علاوه بر همبستگی زمانی هر ایستگاه، همبسـتگی مکـانی میـان سایر ایستگاهها نیز در محاسبات ماتریس نویز در نظر گرفته میشوند. همبستگیهای زمانی و مکانی شناسایی شده بین سری های زمانی موجب بهبود دقت در آنالیز نویز می شود [۱۹ و ۲۰]. طهماسبی و همکاران (۱۳۹۴) مدل های نویز گاوسی، کروی، اتور گرسیو، باردا آلبرتا را با استفاده از آنالیز نویز چندمتغیره بر روی سریهای زمانی تداخلسنجی راداری بررسی نمودهاند. در این مطالعه با تشکیل مدل های خطی، درجه دو و هارمونیک و مدلهای نویز، تمامی پیکسلها به صورت

با توجه به اینکه نقاط پراکنش گرهای دائمی^۵ در آنالیز سری زمانی تداخلسنجی راداری نقشی مشابه ایستگاههای دائمی GNSS ایفا میکنند، مبحث آنالیز نویز سری زمانی در تداخلسنجی راداری نیز میتواند مشابه با GNSS مطرح شود. در همین راستا همبستگی زمانی هر پیکسل و همبستگی مکانی با سایر پیکسلها در راستای تصویر میتواند مورد بحث قرار گیرد. هدف اصلی در این مطالعه، فیلتر سریهای زمانی و تداخلسنجی راداری با در نظرداشتن مدل تابعی و آماری مناسب میباشد. این روند با برآورد مدل آماری با استفاده از آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره انجام میشود.

۲- تداخلسنجی راداری با روزنه مصنوعی

InSAR تکنیکی است که با استفاده از حداقل دو تصویر در زمانهای متفاوت، قادر به تشخیص جابهجایی سطح زمین میباشد. اندازه گیریها در تکنیک تداخلسنجی راداری بر اساس تولید تداخلنماها انجام می گیرند. تداخلنما حاصل ضرب مزدوج مختلط دو تصویر پایه و

پیرو⁹ میباشد که رابطه(۱) بیان گر آن است[۱۴]: $y_1 y_2^* = |y_1||y_2|\exp(j(\varphi_1 - \varphi_2))$ (۱) در رابطه(۱) ضرب مزدوج مختلط دو سیگنال تصاویر پایه y_1 و پیرو y_7 ، تابعی از دامنه سیگنال پایه $|y_1|$ و پیرو $|y_7|$ ، فاز تصویر پایه φ_1 و پیرو φ_7 میباشد. پس از تولید تداخلنما، هر پیکسل از آن را می توان به

همزمان مورد بررسی قرار گرفتهاند. در این مطالعه به دلیل دسترس نبودن تصاویر با فواصل زمانی کوتاه و همچنین تعداد کم دادهها، بررسی همبستگی زمانی امکان پذیر نبوده است. در نهایت با استفاده از آماره -*W* امکان پذیر نبوده است. در نهایت با استفاده از آماره -*test test* بهترین مدل نویز، ترکیب نویز سفید[†] و اتورگرسیو و مناسبترین مدل تابعی، تابع درجه دو انتخاب شدند[11].

[¢] White noise

⁵ Persistent Scatterer

⁶ Slave

¹ Global Navigation Satellite Systems

² Univariate analysis

³ Multivariate analysis

صورت رابطه(۲) بیان نمود[۱۴ و ۲۲]: رابطه(۲) $\Delta \phi = -\frac{4\pi(r_m - r_s)}{\lambda} + (\varepsilon_m - \varepsilon_s)$ در رابطــه(۲) r_n و r_s فواصــل سنســور مــاهواره تــا پیکسلهای تصاویر پایه و پیرو و λ طول مـوج رادیـویی مــیباشـــند. r_s و s_3 فــاز ناشــی از خصوصــیات

بازپراکنش گرها در تصاویر پایه و پیرو هستند که با فرض ثابت بودن در زمانهای تصویربرداری، اختلاف آنها صفر است. منابع تاثیرگذار در تداخلنماهای نهایی بر اساس رابطه(۳)، به شکل زیر مدلسازی میشوند. در این رابطه فاز مشاهداتی در هر پیکسل از تداخلنمای تفاضلی، عبارت است از [۱۲]:

رابطه(۳)

$$\begin{split} \Delta\phi_{obs} &= \Delta\phi_{disp} + \Delta\phi_{top_res} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{orb} + \Delta\phi_{unw_e} + \Delta\phi_{dec} \\ \text{dhen clear clear$$

۲-۱-۱ الگوریتم طول مبنای کوتاه (SBAS)

تکنیک SBAS یکی از روش های تولید سری های زمانی تداخل سنجی راداری، جهت رصد تغییر شکل سطح زمین در گذر زمان می باشد. در این تکنیک به منظور کاهش ناهمبستگی های مکانی و زمانی، تداخل نماهای تفاضلی مناسب با یکدیگر ترکیب می شوند [۱۶]. پیش از تولید تداخل نماها جهت انجام فرآیند SBAS، ابتدا می بایست تصاویر پایه و پیرو هر تداخل نما مشخص شوند. به همین منظور ابتدا نموداری از تصویر با توجه به طول مبنای مکانی و زمانی آن ترسیم می شود (مطابق شکل (۱)). در این روش منظور از طول

مبنای مکانی و زمانی به ترتیب، طول مبنای عمود^۲ و زمان دو تصویر هر تداخلنما میباشند. محور افقی این شکل بیانگر زمان تصویربرداری و محور عمودی آن مشخص کننده طول مبنای مکانی عمود هر تصویر نسبت تصویر پایه ممتاز^۳ میباشند. نقاط گرهای با توجه به حدآستانه مکانی و زمانی مدنظر، به یگدیگر متصل میشوند. در نهایت تولید تداخلنماها بر اساس شبکهای

از تصاویر پایه و پیرو منتخب انجام می شود [۱۶]. پس از تولید تداخل نماها و حذف آشفتگی ها از قبیل خطای ناشی از بازیابی فاز [۶ و ۷] و خطای مداری ماهواره [۹ و ۱۰]، پیکسل های منتخب در فرآیند SBAS شرکت داده می شوند. ارتباط میان فاز ناشی از جابه جایی در زمان های مختلف و مقادیر مشاهداتی در هر پیکسل از تداخل نما را می توان بر اساس رابطه (۴) بیان نمود [۱۶]:

$$\delta \phi_j = \varphi(t_{IE_j}) - \varphi(t_{IS_j})$$
 (۴) رابطه

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots \\ 1 & 0 & -1 & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix}; A = USV^{T}$$
 (Δ)

¹ Phase unwrapping

⁷ Perpendicular baseline

^r Super master



شکل ۱: طول مبنای مکانی و زمانی هر تصویر [۲۳]

m و n مشخص کننده تعداد تداخل نماها و تصاویر و رای j = [1, 2, ..., n] میباشند. با نوشتن رابطه (۴) برای j = [1, 2, ..., n]تمامی تداخلنماها، ماتریس طرح $A_{m\times n}$ مطابق رابطه(۵) ساخته می شود. وارون ماتریس $A_{m imes n}$ از روش تجذیه مقدار تکین (SVD¹) بدست میآید. در نهایت $\hat{\phi}$ مطابق رابطه($\hat{\phi}$) برآورد می گردد. در روابط($\hat{\alpha}$) و (۶)، U و V ماتریسهای متعامد و S ماتریسی قطری است که عناصر آن، مقادیر منفرد ماتریس میباشند. پس از تولید سریهای زمانی می توان A_{m×n} با مدلسازی مولفههای سری زمانی توسط معادله درجه دو و اضافه نمودن مولفه باقیماندهی توپوگرافی، آشفتگیهای ناشی از اثر باقیمانده توپوگرافی را کاهش داد. همچنین باقیمانده سایر آشفتگیها و اثر اتمسفر توسط فیلترهای مکانی و زمانی حذف می گردند [۱۶]. ۲-۲- اعتبار سنجی به کمک ایستگاههای دائمی GNSS از آنجایی که در تکنیک InSAR برآورد جابه جایی و تغییر شکل در راستای دید ماهواره انجام میشود، امکان مقایسه ی مستقیم نتایج این تکنیک و نتایج

ایستگاههای دائمی GNSS وجود ندارد. به همین منظور از تصویر نتایج GNSS در راستای دید ماهواره راداری با

روزنه مصنوعی (SAR^۲) استفاده می شود. بـا اسـتفاده از رابطه(Y) می توان نتایج بدست آمده از داده های GNSS را در راستای دید ماهواره تصویر نمود [۲۴]. در رابطه(۷)، U_u جابه جایی در راستای ارتفاعی، U_u جابه جایی در راستای شمالی جنوبی و U_e جابه جایی در δ_{LOS} و α ، $heta_{inc}$ راستای شرقی غربی است. مولفه های α ، به ترتیب زوایای فرود، آزیموت و خطا در راستای دید

رابطه(۷)

ماهواره می باشند (مطابق شکل (۲)).

 $d_{LOS} = \sin(\theta_{inc}) \left[U_n \sin(\alpha) + U_e \cos(\alpha) \right] + U_u \cos(\theta_{inc}) + \delta_{LOS}$

[\] Singular Value Decomposition

^r Synthetic Aperture Radar

فیلتر سری های زمانی تـداخل سـنجی ر اداری بـا اسـتفاده...

تابعیست که با توصیف حرکت نسبی مشاهدات سری

زمانی، به تمام مشاهدات برازش داده می شود. رابطه (۹)

بیان گر تابعی چند جملهای جهت مدلسازی ترند

مولفه x_{jumps} نقـش مـدلسازی حرکـات تنـد را در

سری های زمانی برعهده دارد. مطابق شکل (۳) با

تعریف تابع یکه پلـهای هویساید $H(t - t_i)^{\mathsf{T}}$ در زمان

معلوم _ti، این حرکات توصیف می گردند. پرش ها

می توانند از نوع طبیعی و غیر طبیعی باشند. پرش های

طبيعی ناشی از عواملی همانند لرزهها، حرکات پوسته

زمین و ... و پرشهای غیرطبیعی ناشی از عواملی

هماننـد تغییـرات آنــتن GNSS در سـریهـای زمـانی

GNSS، خطاهای انسانی و ... ملیباشد [۲۷ و ۲۸].

پرشهای موجود در دادهها را می توان به صورت

مولفه سـوم x_{cycles} مـیباشـد کـه شـامل مولفـههـای

متناوب و فصلی است. جهت مدل سازی این حرکات،

می توان از تابع هارمونیک استفاده نمود [۱۹ و ۲۶].

رابطه(۱۰) بیان نمود[۲۶]:

رابطه(۱۰)

 $x_{trend} = \sum_{i}^{n_{p}+1} P_{i} (t - t_{R})^{i-1}$

 $x_{jumps} = \sum_{i=1}^{n_j} b_j H(t - t_j)$

^۲ Heaviside



شکل۲: آزیموت راستای دید ماهواره SAR و زاویه فرود در مدار پایینگذر

می باشد [۲۶]:

, ابطه(۹)

۳ – آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره
 مدل ریاضی مشاهدات را میتوان به صورت ترکیبی از
 مدل تابعی و مدل آماری بیان نمود[۲۵].
 ۳ – ۱ – مدل تابعی
 مدل تابعی مجموعه ای از معادلات میباشد که ارتباط
 میان مشاهدات و مجهولات را بیان مینماید. یکی از

میان مشاهدات و مجهولات را بیان مینماید. یکی از انواع مدلهای تابعی جهت توصیف سریهای زمانی، مدل خط سیر ^۱ میباشد. این مدل از مجموع ترند، پرش و حرکات تناوبی تشکیل میشود. با تعریف ترند *xtrend* میشود. بسته به تغییرات سری زمانی و با توجه به میشود. بسته به تغییرات سری زمانی و با توجه به منطقه مورد مطالعه و مشاهدات، میتوان از توابع خطی و غیرخطی جهت مدل سازی این مولفه استفاده نمود. مولفه *xjumps* نقش توصیف پرشها و تغییرات تند موجود در مدل را بر عهده دارند. دیگر مولفه حاضر، موجود در مدل را بر عهده دارند. دیگر مولفه حاضر، است. در کنار مولفههای مذکور مولفهی خطا *a* موجود در سری زمانی نیز حاضر میباشد. برای درک بیشتر این مدل، به بررسی مولفههای مذکور در رابطه(۸)

 $x(t) = x_{trend} + x_{jumps} + x_{cycles} + e$ (۸) رابطه مولفه x_{trend} نقش مدل سازی ترند را بیان می کند و

[\] Trajectory





مطابق رابطه(۱۱)، این تابع متشکل از جملات و ضرایب فوریه می باشد و با توجه به مقدار بسامد زاویه ای ،*۵* این مولفه می تواند بیان گر سیگنال هایی با فرکانس های متفاوت اعم از سالانه و نیم سالانه باشد [۲۶]:

$$x_{cycles} = \sum_{k=1}^{n_f} \left[s_k \sin(\omega_k t) + c_k \cos(\omega_k t) \right] \quad (11)$$

$$\omega_k = \frac{2\pi}{\tau_k}$$
 (۱۲) رابطه

$$\tau_k = \frac{1}{k}$$
 (۱۳) رابطه

 n_f و s_k (۱۱) فوریه سری فوریه و r_k و s_k (۱۱) خرابطه (۱۱) و r_k و s_k میابشند. در روابط (۱۲) و (۱۳)، k و r_k به ترتیب بیانگر فرکانس و دوره تناوب متناوب میاب اسامد زاویه ای فرکانس های سالانه و نیم سالانه به ترتیب برابر برا میاب و نیم سالانه به ترتیب و خطاهای فصلی سری های زمانی ناشی از منابع ژئوفیزیکی و خطاهای سیستماتیک قابل مدل می باشند [۲۹].

۳-۲- مدل آماری

تعیین واریانس (کواریانس) و وزن دهی مشاهدات در قالب مدل آماری بیان می شود. این مدل به منظور توصیف مقادیر مدل نشده توسط مدل تابعی تعریف می شود. به کمک آنالیز نویز کمترین مربعات می توان مدل آماری را تشخیص داد. بر این اساس مدل آماری مطابق رابطه (۱۴) نوشته می شود [۲۰]:

 $D(\underline{y}) = Q_y = Q_0 + \sum_{k=1}^p \sigma_k Q_k$ (۱۴) رابطه در رابطـه(۱۴)، مولفـههـای .Q. و σ_k بـه ترتيب

قسمت معلـوم مـاتریس واریـانس کواریـانس، مـاتریس کوفـاکتور و مولفـههـای مـاتریس واریـانس کواریـانس میباشند. در این رابطـه p تعـداد مولفـههـای واریـانس (کواریـانس) مـیباشـد. جهـت سـاخت مـاتریسهـای کوفاکتور، از قانون توان^۱ استفاده میشود.

قانون توان یکی از انواع مدلهای آماری معمول برای سیگنالهای ژئوفیزیکی، با امکان حضور نویز میباشد. قانون توان بر اساس رفتار یک بعدی زمان مطابق رابطه(۱۵) بیان میشود[۱۸ و ۳۰]:

$$P_{y}(f) = P_{0} \left(\frac{f}{f_{0}}\right)^{k}$$
 (۱۵) رابطه (۱۵)

در رابطه(۱۵) توان طیفی^۲(f) بر اساس فرکانس زمانی f و ضرایب نرمال کننده f و f تعریف میشود. در این رابطه k ضریب طیفیست و عموما در بازهی[f, [-"] میباشد. حالات خاص در این مدل، مقادیر صحیح (دادن ضریب طیفی k است. در این موارد با قرار دادن k=، نویز سفید کلاسیک^۳، 1-=k نویز فلیکر[†] و 7-=kنویز رندومواک^۵، تولید می شود[10 و 10]. جهت مدل سازی نویز سفید می توان از ماتریس همانی مدل سازی ماتریس

^a Random walk noise

Power law

^r Power spectrum

^r Classic white noise

⁴ Flicker noise

رابطه(۱۶)

$$Q_{ij}^{f} = \begin{cases} \frac{9}{8} & \tau \neq 0\\ \frac{9}{8} \left(1 - \frac{\log \tau}{\log 2} + 2 \right) & \tau = 0 \end{cases}$$

ſO

در رابطه(۱۶) Q_{ij}^f مولفه سطر *i*ام و ستون *ز*ام ماتریس کوفاکتور نویز فلیکر، *i* و *j* مولفههای سری و $\tau = \tau$ $|t_i - t_j|$ میباشد. جهت مدلسازی ماتریس کوفاکتور نویز رندومواک از رابطه(۱۷) استفاده می شود [۱۸]: رابطه(۱۷)

$$Q_{rw} = f_s^{-1} \begin{bmatrix} 1 & \cdots & \cdots & 1 \\ \vdots & 2 & \cdots & \cdots & 2 \\ \vdots & \vdots & 3 & \cdots & 3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 2 & 3 & \cdots & m \end{bmatrix} f_s = \frac{m-1}{T}$$

در رابطـه(۱۷) m تعـداد مولفـههـای سـری زمـانی، f_s فرکانس نمونهبرداری و T بازه زمانی نمونـهبـرداری بـر حسب سال میباشند.

۴-۳- بـر آورد مولفـههای ماتریس واریانس کواریانس با استفاده از بـر آورد مولفـه واریانس کمترین مربعات ('LS-VCE)

پس از ساخت ماتریس کوفاکتور نویز مطابق بخش ۳–۳ و جایگذاری در رابطه(۱۴)، میبایست <u>6ر</u>ا با استفاده از روش LS-VCE مطابق رابطـه(۱۸) بـرآورد نمـود[۱۸ و [۳۱]:

$$\underline{\hat{\sigma}} = N^{-1} \underline{l}$$
 (۱۸) رابطه (۱۸)

در رابطه(۱۸)، _{۷۳×} ماتریس نرمال و <u>ا</u> بردار مشاهدات می اشند که عناصر آن از روابط(۱۹) تـا (۲۱) بدست می آیند:

محسن زینلپور و همکار ان

$$n_{ij} = \frac{1}{2} tr(Q_j Q_y^{-1} P_A^{\perp} Q_i Q_y^{-1} P_A^{\perp})$$
 (19)

$$l_{i} = \frac{1}{2} \hat{\underline{e}}^{T} Q_{y}^{-1} Q_{i} Q_{y}^{-1} \hat{\underline{e}}$$
 (Y ·)

$$P_{A}^{\perp} = I - A(A^{T}Q_{y}^{-1}A)^{-1}A^{T}Q_{y}^{-1}$$
 (1)

در روابط(۱۹) تا (۲۱)، i e j مولفههای سطری و ستونی P_A^{\perp} در روابط(۱۹) تا (۲۱)، $\frac{i}{2}$ بردار باقیماندههای ظاهری، P_A^{\perp} بردار باقیماندههای ظاهری، جاریان تصویر گر قائم، A ماتریس طرح و Q ماتریس واریانس کواریانس می باشد. در نهایت ماتریس واریانس $C_{\widehat{\sigma}} = N^{-1}$ میاترد شده برابر با

(*MLE*^۲) آزمون بیشینه درستنمایی (

یکی از روشهای موجود جهت انتخاب مناسب ترین مدل مشاهداتی، آزمون MLE می باشد. بر این اساس، تابع درست نمایی^۳ مناسب ترین مدل، دارای مقدار بیشینه است. با فرض نرمال بودن تابع چگالی احتمال برآورد درست نمایی به صورت رابطه (۲۲) است [۳۱]: رابطه (۲۲)

$$\ln L(y; x, \sigma) = -\frac{m}{2} \ln 2\pi - \frac{1}{2} \ln \det(Q_y) - \frac{1}{2} \underline{\hat{e}}^T Q_y^{-1} \underline{\hat{e}}$$

$$c, (l!+d*)(Y), m \text{ racks a model of a mode$$

۴- پیادەسازی و نتایج

منطقه مطالعاتی در این مطالعه، شمال غربی جزیره هاوایی میباشد. این جزیره یکی از زلزله خیزترین مناطق جهان میباشد. در این منطقه سالانه به طور متوسط هزاران زمین لرزه رخ میدهد. بزرگای برخی از این زلزلهها به قدری کوچک میباشد که تنها توسط لرزه نگارها و ابزار دقیق قابل اندازه گیری هستند. طبق اطلاعات زمین لرزه نگاری از سال ۱۸۲۳ میلادی تاکنون به طور متوسط سالانه ۱۰۰ زمین لرزه به بزرگای حدود

¹ Least Squares Variance Component Estimation

² Maximum Likelihood Estimation

[&]quot; Likelihood

نشریه علمی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم • شماره نخست • بهار ۱۴۰۲

۳، ۱۰ زمین لرزه به بزرگای حدود ۴ و ۱ زمین لرزه به بزرگای حدود ۵ رخ داده است. علاوه بر این اطلاعات هر ۱۰ سال یک زمین لرزه به بزرگای حدود ۶ و هر ۱۰۰ سال یک زمین لرزه به بزرگای ۷ رخ داده است. همچنین بیشترین میزان رخداد زلزله در مناطق جنوبی این جزیره می باشد [۳۲].

۴–۱- پردازشهای سریهای زمانی تداخل سنجی راداری

دادههای مورد استفاده در این مطالعه، تصویر پایین گذر ^۱ ماهوارهی سنتینل^۲ ۱۸ و ۱۶ میباشد. شکل(۴) نمایانگر موقعیت منطقه نسبت به تصویر ماهواره سنتیل ۱ میباشد. اندازهی تصویر پردازش شده ۵۲۱×۵۰۱ پیکسل (آزیموت ×رنج) میباشد. پردازشهای تولید سریهای زمانی به روش طول مبنای کوتاه جدید (NSBAS^۳) و با استفاده از نرمافزار لیکسباس^۴ انجام شده است. همچنین پردازشهای مربوط به آنالیز نویز کمترین مربعات در محیط پایتون انجام شده است.

در نرم افزار لیکسباس با استفاده از تداخلنماهای از پیش تولیدشده، امکان تولید سریهای زمانی بر اساس الگوریتم NSBAS مهیا شده است. همچنین جهت جلوگیری از اختلال در روند بازیابی فاز، به این تداخلنماها ضریب چند منظری^۵ با نسبت برد به آزیموت ۲۰ به ۴ و فیلتر گاما^۶ اعمال گردیده است[۳۴]. در این مطالعه فرآیند NSBAS با استفاده از ۱۳۹۴ تداخلنما متشکل از ۲۰۰ تصویر در بازهی زمانی

- ^a Multi looking
- ۶ GAMMA

با تعریف حدآستانه مکانی و زمانی، شبکهی تداخل نماها مطابق پیوست (۱) ترسیم می شود. در ایـن شـبکه، تصویر پایه یمتاز، تصویر ۲۰۱۵/۱۱/۱۱ می باشـد. در نرمافزار لیکسباس تصحیحات اتمسفری بـا اسـتفاده از مدل های خـدمات بـرخط عمـومی تصـحیح اتمسفری (^۷*GACOS*) اعمال می شود[۳۴]. این فرآیند بـا بـرآورد تاخیر قاز در هر تصویر انجـام می شود. در شکل (۵) تاخیر فاز در هر تصویر انجـام می شود. در شکل (۵) نمونه هایی از تصحیحات مدل اتمسفری بر تداخل نماها نمونه هایی از تصحیحات مدل اتمسفری بر تداخل نماها تداخل نمای تصحیح نشده و شکل (۵–ب) تـداخل نمای تداخل نماهای تصحیح نشده و تصـحیح شـده بـه ترتیب برابر [۸, ۸–] و [۲٫۵, ۲٫۵–] میلی متر می باشند. پـس از حـذف اثـر اتمسفر بـه روش مـذکور، مسـئله

پس از حذف اثر اتمسفر به روش مذکور، مسئله معکوس با استفاده از تداخل نماهای تصحیح شده حل می شود. پس از تولید سری های زمانی، از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر جهت بهبود نتایج سری های زمانی استفاده می گردد. نتایج NSBAS مطابق شکل(۶) می باشد. این شکل بیان گر سرعت متوسط جابه جایی از تاریخ ۲۰۱۵/۱۱/۱۱ الی ۲۰۲۲/۰۶/۰۷ می باشد. سرعت متوسط جابه جایی در این منطقه در بازهی [۶۴, ۶۲–] میلی متر در سال قرار دارد و در شکل زیر، جهت نمایش مناسب آن در بازه [۵/۲, ۵/۱۸–] میلی متر در سال محدود شده است.

^v Generic Atmospheric Correction Online Service

[\] Descending

^v Sentinel

[&]quot; New Small Baseline Subset

[†] LiCSBAS

۴۶

فیلتر سری های زمانی تـداخل سـنجی ر اداری بـا اسـتفاده...

محسن زینلپور و همکار ان



شکل ۴: موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاههای GNSS[۳۳]

شکل ۵: تاثیر تصحیح اتمسفری بر تداخلنمای حاصل از دو تصویر ۲۰۱۵٬۱۱٬۱۱ و ۲۰۱۵٬۱۲٬۰۵. شکل (۵–الف) تداخلنمای تصحیح شده توسط مدل اتمسفری GACOS

۲/۵ -۲/۵ -۲/۵ -۲/۵ -۱۰ -۱۰ -۱۰۵ -۱۰۲/۵ -۱۰۵ -۱۰۷/۵

سرعت متوسط جابهجایی (میلیمتر بر سال)

^۰۴۰^۵۵۵ غربی ^۰۵۰ ^۵۵۵ غربی ^۰۰۰^۰۵۵ غربی شکل ۶: سرعت متوسط جابهجایی منطقه

مشاهدات، نیاز به داشتن همزمان مدل تابعی و آماری مناسب میاشد. در این مطالعه مدلهای تابعی بررسی شده مطابق روابط(۲۳) تا (۲۶) شامل ترکیب ترند خطی و درجه دو، تابع هویساید و توابع هارمونیک می باشند.

۴–۲– تصحیح با استفاده از آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره پس از تولید سریهای زمانی جابه حایی در راستای دید ام ام استان ۲۰۰۰ میلید استان میلید.

ماهواره SAR، مدلهای تابعی و آماری بـرای هـر سـری زمانی سـاخته مـیشـوند. جهـت مـدلسـازی مطلـوب

$$\left[Y_{i} = P_{1} + P_{2}(t_{i}) + \sum_{j=1}^{n_{j}} b_{j}H(t_{i} - t_{j}) + \sum_{k=1}^{2} [s_{k}\sin(2k\pi t_{i}) + c_{k}\cos(2k\pi t_{i})] + e^{-\frac{1}{2}(t_{i})}\right] + e^{-\frac{1}{2}(t_{i})}$$

$$\begin{cases} Y_i = P_1 + P_2(t_i) + P_3(t_i)^2 + \sum_{j=1}^{n_j} b_j H(t_i - t_j) + \sum_{k=1}^{2} [s_k \sin(2k\pi t_i) + c_k \cos(2k\pi t_i)] + e \end{cases}$$
(Yf)

$$Y_{i} = P_{1} + P_{2}(t_{i}) + \sum_{k=1}^{k} [s_{k} \sin(2k\pi t_{i}) + c_{k} \cos(2k\pi t_{i})] + e$$

$$(\Upsilon \Delta)_{i}$$

$$\left| Y_{i} = P_{1} + P_{2}(t_{i}) + P_{3}(t_{i})^{2} + \sum_{k=1}^{2} [s_{k} \sin(2k\pi t_{i}) + c_{k} \cos(2k\pi t_{i})] + e \right|$$
(Y8)

پرشها در این مطالعه با در اختیار داشتن زمان زلزله از طریق دادههای زمینلرزهنگاری مطابق پیوست (۲) مدل سازی شدهاند [۳۵]. تابع یکه پلهای هویساید جهت مدل سازی این مولفه در زمانهای قبل از وقوع زلزله برابر صفر و زمانهای پس از زلزله برابر یک میباشد. مطالعات پیشین در زمینه سریهای زمانی GNSS و ژئوفیزیکی در مولفه های متناوب و فصلی میباشد. مطالعات پیشین در زمینه سریهای زمانی GNSS روابط فوق ترکیبی از ترند خطی و درجه دو، تابع هویساید ، مولفههای متناوب و باقیماندهها میباشند. رابطه(۲۳) و (۲۴) نمایانگر ترند خطی و درجه دو به همراه تابع هویساید و مولفههای متناوب میباشند. در رابطه(۲۵) و (۲۶) ترند خطی و درجه دو به همراه مولفههای متناوب حضور دارند و تابع هویساید در این مدلها شرکت داده نشده است. با قرار دادن $r_R = t$ مدلها شرکت داده نشده است. با قرار دادن $n_p = 0, 1$ سریهای زمانی برای هر مشاهده مدل سازی میشود.

بیانگر وجود مولفههای سالانه و نیم سالانه در این مشاهدات دارند [۲۰]. همچنین مطابق مطالعات انجام شده در زمینه سریهای زمانی تداخل سنجی راداری، مولفههای سالانه در این مشاهدات استخراج شدهاند [۳۶ و ۳۷]. با توجه به رویکرد اصلی این مطالعه در زمینهی شناسایی مدل آماری مناسب، با فرض وجود مولفههای سالانه و نیم سالانه دامنه آنها با استفاده از تابع هارمونیک به روش کمترین مربعات (*IS-HE*) مدل سازی می شوند. جهت ساخت مدل آماری، از نویزهای رنگی و ترکیب آنها استفاده شده است. با فرض وجود نویز سفید در تمامی مدل ها و همچنین فرض وجود نویز سفید در تمامی مدل ها و همچنین روابط (۲۲)، مدل های نویز را می توان به صورت روابط (۲۷) تا (۳۰) نوشت:

- $Q_y = Q_w$ (۲۷) رابطه
- $Q_v = Q_w + Q_f$ (۲۸) رابطه
- $Q_v = Q_w + Q_{rw} \tag{79}$
- $\left| Q_{y} = Q_{w} + Q_{f} + Q_{rw} \right|$ (۳۰) ابطه (۳۰),

مطابق آنالیز نویز به روش کمترین مربعات ابتدا با استفاده از قانون توان، ماتریسهای نویز سفید، فلیکر و رندومواک ساخته می شوند. در ادامه با استفاده از روش *LS-VCE*، مولفههای واریانس کواریانس هر مدل بر آورد می گردد. در نهایت بهترین مدل نویز از میان مدل های ساخته شده با استفاده از روش *MLE* مشخص می گردد. نتایج بدست آمده حاکی از این است که در تمامی نیکسل ها روابط (۲۳) و (۲۷) به عنوان مناسب ترین مدل های تابعی و آماری انتخاب شدند. در ادامه نتایج پیکسل های شامل ایستگاههای *GNSS* بررسی شدهاند. **۴–۳– ارزیابی نتایج با استفاده از سری های زمانی ایستگاههای دائمی GNSS**

ایستگاههای بررسی شده مطابق شکل (۴) شامل CHRS و NIHO ERLY MLAN MAHU میباشند[۳۸]. جهت مقایسه نتایج میبایست نتایج

ایستگاه GNSS در راستای دید ماهواره سنتینل ۱ تصویر شوند. دادههای GNSS مورد استفاده، حل نهایی هستند و به دلایل مختلف از قبیل قطع شدن ارتباط میاهواره و گیرندده دارای پیوستگی زمانی نمی باشند [۳۸]. با فرض عاری بودن این نتایج از خطا، تصحیحات انجام شده در تکنیک SBAS مورد ارزیابی قرار می گیرند. جدول (۱) به موقعیت ایستگاههای GNSS اشاره می نماید.

زاویه فرود و آزیموت متوسط ماهواره در منطقه مطالعاتی به ترتیب برابر[°]۳۳٬۹۲۸ و ۱۹۰٬۷۹۸۹ می باشند. با استفاده از رابطه(۷)، سریهای زمانی GNSS در راستای دید ماهواره سنتینل تصویر می شوند. مطابق اشکال (۷) الی (۱۱)، نقاط قرمز رنگ نتایج GNSS در راستای دید ماهواره، نقاط آبی رنگ نتایج SBAS با تصحیح مدل اتمسفری و فیلترهای بالاگذر و پایین گذر، نقاط سبز رنگ نتایج فیلتر نتایج با استفاده از ماتریس نویز حاصل از آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیرہ و نقاط مشکی رنے نتایج بدست آمده پیش از اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین گذر می باشند. همچنین در این اشکال، رگرسیون خطی جهت نمایش روند نسبی هر روش ترسیم شده است. در اشکال (۸)، (۹) و (۱۱) که به ترتیب بیان گر رفتار ایس___تگاهه__ای RLX ،MLAN و CHRS هس___تند، رگرسیون خطی، نشاندهنده نزدیک بودن روند نسبی نتایج روشهای آنالیز نویز کمترین مربعات و فیلترهای بالاگذر و پایین گذر است.

در مقابل با بررسی شکل (۷) که نشان دهنده رفتار ایستگاه MAHU است، مشاهده می شود که رگرسیون خطی در دوحالت قبل و بعد از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر از نتایج متناظر در حالت آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره به نتایج ایستگاههای GNSS نزدیک تر است. با این وجود مطابق جدول(۲) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره بهتر از دو حالت ذکر شده است. با توجه به نکات ذکر شده می توان به این نتیجه رسید که

[\] Least Squares Harmonic Estimation

حالت دیگر به رگرسیون خطی دادههای GNSS نزدیکتر است. همچنین در این ایستگاه، پیش از اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین گذر پراکندگی سری زمانی از دو حالت دیگر بیشتر است. با استفاده از آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره، از پراکندگی مشاهدات کاسته می شود. در شکل(۱۰) که نشان دهنده رفتار ایستگاه NIHU است، رگرسیون خطی آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره از دو

CHRS	NIHO	ERL2	MLAN	MAHU	نام ایستگاه	
-108/084	-100,V019	-120,978X	-120/2829	-120/2947	طول جغرافيايي	
۱۹, ۷۲۳ ۰	۱۹٫۸۱۷۸	۱۹٫۸۵۲۳	19,9474	۲۰,۱۹۱۹	عرض جغرافيايي	

جدول ۱: موقعیت ایستگاههای دائمی GNSS

شکل ۷: تصحیحات مختلف در ایستگاه MAHU (نقاط قرمز نشاندهنده نتایج GNSS، نقاط آبی نشاندهنده نتایج تحت تاثیر فیلترهای بالاگذر و پایین گذر، نقاط سبز نتایج تحت تاثیر ماتریس وزن آنالیز نویز تکمتغیره و نقاط مشکی رنگ نشاندهنده نتایج پیش از اعمال فیلتر)

شکل ۸: تصحیحات مختلف در ایستگاه MLAN

فیلتر سری های زمانی تـداخل سـنجی ر اداری بـا اسـتفاده...

شکل ۹: تصحیحات مختلف در ایستگاه ERL2

شکل ۱۱: تصحیحات مختلف در ایستگاه CHRS

نشریہ علمی – مہندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم • شماره نخست • بهار ۱۴۰۲

یس از بدست آوردن نتایج فوق، مطابق جدول (۲)، می توان RMSE روش های اعمال شده را با داده های GNSS مقايسه نمود. اين فرآيند با فرض ناچيزبودن خطای نتایج GNSS و در زمان های موجود انجام می شود. لازم به توضیح می باشد که جهت بررسی پیکسل شامل ایستگاه GNSS، از مقادیر پیکسلهای مجاور به شعاع ۲۰۰ متر میانگین گیری می شود. کمترین میزان RMSE نتایج حاصل از تصحیح به کمک فیلترهای بالاگذر و پایین گذر، ۸٫۷ میلیمتر و بیشترین مقدار آن ۲۵٫۵ میلیمتر میباشد. با بررسی نتایج با استفاده از آنالیز نویز تکمتغیره، کمترین میزان RMSE برابر ۶٫۲ میلیمتر و بیشترین میزان آن ۱۶٫۲ میلیمتر میباشد. یس از محاسبهی RMSE، میتوان میزان بهبود هر روش را نسبت نتایج فیلترنشده برآورد نمود. مطابق جدول (۳) نتایج حاکی از این است که در سه ایستگاه از ینج ایستگاه بررسی شده، تمامی تصحیحات

اعمال شده موجب بهبود دقت سریهای زمانی شدهاند. فرآیند فیلتر با استفاده از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر به طور متوسط به میزان ۲۸٪ بهبود داشته است. میزان بهبود با استفاده از ماتریس نویز کمترین مربعات تکمتغیره به طور متوسط ۴۳٪ میباشد. در ایستگاه OHIN اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین گذر باعث کاهش بهبود به میزان ۳۹٪ شده است. به تبع آن میتوان عنوان داشت در صورت استفاده از این نوع فیلترها، امکان از دست رفتن اطلاعات صحیح وجود فیلترها، امکان از دست رفتن اطلاعات صحیح وجود آنالیز کمترین مربعات تکمتغیره به صورت مجزا برای هر پیکسل بدست آمده است و تنها همبستگی زمانی سریها در آنها اعمال گردیده است. این در حالیست که فیلترهای بالاگذر و پایین گذر در راستای مکانی و زمانی اعمال میشوند.

مختلف	ارستگامهام		فتارج	RMSE	٠۲	10.10
and	أيستعادهاي	ىر	سيج	NINDL	• 1	جنون

CHRS	NIHO	ERL2	MLAN	MAHU	نام ایستگاه		
١٨,٠	۰.۶	٨,٧	١٠,٩	۲۵,۵	RMSE نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری و فیلترهای بالاگذر و پایین گذر(mm)		
١۶,٢	۶,۲	٩,٩	۱۴٫۲	۱۵٫۱	RMSE نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری و سرشکنی با استفاده از ماتریس نویز آنالیز کمترین مربعات تکمتغیره(mm)		
٣۴,۴	۷٫۶	١٨٫٨	۳۰,۶	۲۷٫۹	RMSE نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری پیش از اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین گذر(mm)		

جدول ۳: تصحیحات در ایستگاههای مختلف

CHRS	NIHO	ERL2	MLAN	MAHU	نام ایستگاه
۴۸%	- ٣٩ %	۵۴٪.	۶۴٪.	٩%.	درصد بهبود نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری و فیلترهای بالاگذر و پایین گذر
۵۳%	١٨%	۴۷%	۵۴%	46%	درصد بهبود نتایج حاصل از اعمال مدل اتمسفری و سرشکنی با استفاده از ماتریس نویز آنالیز کمترین مربعات تکمتغیره

۴-۴- آنالیز نویز تکمتغیره در پیکسلهای شامل ایستگاههای GNSS

پس از انتخاب مدل تابعی و آماری مناسب، مشاهدات با استفاده ماتریس واریانس کواریانس مربوطه، باز تولید می شود. در این مطالعه مناسب ترین مدل تابعی رابطه (۲۳) شامل ترند خطی، تابع هویساید و تابع هارمونیک و مناسب ترین مدل آماری رابطه (۲۷) شامل نویز سفید انتخاب شدند. در ادامه $\hat{\sigma}$ در هر پیکسل با استفاده از رابطه (۱۸) محاسبه می شود. مقادیر $\hat{\sigma}$ و انحراف معیار متناظر آن در هر پیکسل مطابق جدول (۴) می باشد. مطابق این جدول، نویز شناسایی

 $\widetilde{\sigma}$ شده در ایستگاه NIHO کمترین و در ایستگاه MAHU بیشترین میزان آن میباشد. با بررسی انحراف معیار $\widehat{\sigma}$ و MSE روش آنالیز نویز کمترین مربعات در هر ایستگاه، میتوان به ارتباط این دو مولفه پیبرد. مطابق شیکل(۱۲) همبستگی RMSE آنالیز نویز کمترین مربعات و انحراف معیار متناظر آن برابر ۱۹٬۱ میباشد و این میزان، نشاندهنده همبستگی بالای این دو مولفه، میتوان به است. با توجه به همبستگی این دو مولفه، میتوان به این نکته اشاره نمود که در صورت بررسی و شناسایی این نکته اشاره نمود که در صورت بررسی و شناسایی مدل آماری مناسبتر، انتظار میرود نتایج مطلوب تری حاصل شود.

	-			_	
نام ایستگاه	MAHU	MLAN	ERL2	NIHO	CHRS
$(mm) \hat{\sigma}$	5449	٨٨٠	۲۳۸	38	8921
انحراف معيار (mm)	۲۸٬۵۶	۱۸٬۰۸	١٧,٣٠	A_{i}))	28,7V

جدول ۴: مقدار $\widehat{\sigma}$ در پیکسلهای حاوی ایستگاههای GNSS

شکل ۱۲: همبستگی RMSE روش آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره و انحراف معیار نویز بر آورد شده

۴- بحث و نتیجهگیری

نادیده گرفتن تـاثیر نویزهـا و آشـفتگیهـای موجـود در سریهای زمانی تداخلسنجی راداری، باعث اختلال در نتایج می گردد. در این مطالعـه مشـاهده مـیشـود کـه

استفاده از مدلهای اتمسفری در برخی موارد جهت حذف نویزهای موجود کافی نمی باشد. هدف اصلی در این مطالعه، فیلتر سریهای زمانی تداخل سنجی راداری با در نظر داشتن مدل تابعی و آماری مناسب می باشد.

نشریه علمی – مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم • شماره نخست • بهار ۱۴۰۲

این روند با برآورد مدل آماری با استفاده از آنالیز نویز كمترين مربعات تكمتغيره انجام مي شود. به همين منظور ابتدا سرىهاى زمانى نهايى تداخل سنجى رادارى به همراه اعمال تصحیحات اتمسفری با استفاده از مدل GACOS تولید شدهاند. در ادامه سریهای زمانی نهایی با استفاده دو روش فیلترهای بالاگذر و پایین گذر و ماتريس نويز آناليز كمترين مربعات تـكمتغيره، فيلتـر می شوند. این روند در فیلترهای بالاگذر و پایین گذر در راستای مکان و زمان و در روش آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره، در راستای زمان اعمال می شود. جهت آنالیز نویز کمترین مربعات تکمتغیره، ابتدا مدلهای تابعی و آماری مختلف ساخته شدند. سپس با استفاده از آزمون MLE، مدل تابعی و آماری شامل ترند خطی با حضور تابع هویساید، تابع هارمونیک و نویز سفید به عنوان مناسب ترین مدل ها انتخاب شدند. در نهایت سریهای زمانی توسط این مدل بازتولید شدند. نتایج حاصل از این فرآیند با فیلترهای بالاگذر و پایین گذر و سری های زمانی GNSS مقایسه شدند. نتایج حاکی از این است که با استفاده از ماتریس نویز پيوست

کمترین مربعات تکمتغیره، به طور متوسط ۴۳٪ بهبود دقت حاصل شده است. این در حالی است که با استفاده از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر نتایج به میزان ۲۸٪ بهبود داشتهاند. لازم به ذکر است در ایستگاه NIHO، اعمال فیلترهای بالاگذر و پایین گذر باعث کاهش بهبود به میزان ۳۹٪ شده است. همچنین در تصحیح سریهای زمانی با استفاده از ماتریس نویز آنالیز تکمتغیره، کاهش بهبود در سریهای زمانی مشاهده نگردید و پراکندگی سری زمانی کاهش یافته است. در مقابل در صورت استفاده از فیلترهای بالاگذر و پایین گذر، امکان از دست رفتن اطلاعات صحیح وجود دارد.

تشكر و قدردانى

با تشکر از داوران محترم که نظرات مفید ایشان موجب بهبود کیفیت این مطالعه گردید. با تشکر از سامانه لیکسباس که امکان پردازشهای لازم تداخلسنجی راداری در آن فراهم شده است.

محسن زینلپور و همکار ان

تاريخ وقوع 5.55/58/58 5.51/11/26 7.7.1.4/.1 1.19/.4/19 ۲ • ۱ ۸/ • ۸/۱۵ 5.11/.7/18 2.18/08/21 ۲۰۲۱/۱۰/۱۸ 1.19/17/.7 5.55/0/18 1.19/.4/14 7.11/.4/.8 5.14/.5/10 7.18/.7. 7.77/0/00 5.51/.1/78 1.19/11/.9 7.19/.7/.7 ۲ • ۱ ۸ / • ۳ / ۱ • 5.14/.7/14 5.10/11/18 5.51/.9/51 ۲.۱۹/۱۱/۰۸ 1.19/.1/11 5.11/.7/10 1.11/.4/19 5.14/.1/.0 5.51/.0/59 5.19/.5/.8 7.77/.4/.9 1.19/1.11 5.11/17/28 1.18/11/1. 5.51/.4/.4 1.19/.9/22 1.19/.1/19 1.18/11/.9 7.77/.79 5.11/11/20 ۲.τ./.λ/۲. 7.19/.9/14 1.11/11/21 ۲ • ۱ ۸/۱۱/•۵ 5.14/1.1/1 1.18/11/18 5.21/12/18 T · T · / · ۵/TV 5.19/0/26 7.11/.9/71 2010/08/26 7.18/.9/.4 ۲ • ۱ ۹/ • ۵/ • ۱ 5.11/.9/20 5.11/0/18 1.18/.8/.9 5.21/12/08 5.2.10

پیوست ۲: تاریخ وقوع زلزله در منطقه مطالعاتی

- [1] Y. Cao, Z. Li, J. Wei, J. Hu, M. Duan, and G. Feng, "Stochastic modeling for time series InSAR: with emphasis on atmospheric effects," Journal of Geodesy, vol. 92, no. 2, pp. 185-204, 2018.
- [2] P. Agram and M. Simons, "A noise model for InSAR time series," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 120, no. 4, pp. 2752-2771, 2015.
- [3] D. Raucoules and M. De Michele, "Assessing ionospheric influence on L-band SAR data: Implications on coseismic displacement measurements of the 2008 Sichuan earthquake," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 7, no. 2, pp. 286-290, 2009.
- [4] W. D. Barnhart and R. B. Lohman, "Characterizing and estimating noise in InSAR and InSAR time series with MODIS," Geochemistry, Geophysics, Geosystems, vol. 14, no. 10, pp. 4121-4132, 2013.
- [5] W. Gong, F. J. Meyer, S. Liu, and R. F. Hanssen, "Temporal filtering of InSAR data using statistical parameters from NWP models," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 53, no. 7, pp.

4033-4044, 2015.

- [6] Z. Yunjun, H. Fattahi, and F. Amelung, "Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction," Computers & Geosciences, vol. 133, p. 104331, 2019.
- [7] R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. J. R. s. Werner, "Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping," vol. 23, no. 4 ,pp. 713-720, 1988.
- [8] J. Biggs, T. Wright, Z. Lu, and B. J. G. J. I. Parsons, "Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation: Denali Fault, Alaska," vol. 170, no. 3, pp. 1165-1179, 2007.
- [9] E. Hussain, A. Hooper, T. J. Wright, R. J. Walters, and D. P. J. J. o. G. R. S. E. Bekaert, "Interseismic strain accumulation across the central North Anatolian Fault from iteratively unwrapped InSAR measurements," vol. 121, no. 12, pp. 9000-9019, 2016.
- [10]M. Dalaison and R. Jolivet, "A Kalman filter time series analysis method for InSAR," Journal of Geophysical Research:

مراجع

Solid Earth, vol. 125, no. 7, p. e2019JB019150, 2020.

- [11]Y. Cao, Z. Li, and F. J. J. o. G. Amelung, "Mapping ground displacement by a multiple phase difference-based InSAR approach: with stochastic model estimation and turbulent troposphere mitigation," vol. 93, no. 9, pp. 1313-1333, 2019.
- [12] R. F. Hanssen, "Stochastic modeling of time series radar interferometry," in IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004, vol. 4: IEEE, pp. 2607-2610.
- [13]S. Samsonov, "Topographic correction for ALOS PALSAR interferometry," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 7, pp. 3020-3027, 2010.
- [14]R. F. Hanssen, Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Springer Science & Business Media, 2001.
- [15] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Analysis of permanent scatterers in SAR interferometry," in IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120), 2000, vol. 2: IEEE, pp. 761-763.
- [16]P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, "A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 40, no. 11, pp. 2375-2383, 2002.
- [17]A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 39, no. 1, pp. 8-20, 2001.
- [18]A. R. Amiri-Simkooei, C. C. Tiberius, and P. J. Teunissen, "Assessment of noise in GNSS coordinate time series: methodology

and results," Journal of Geophysical Research: Solid Earth, vol. 112, no. B7, 2007.

- [19]A. Amiri-Simkooei, "Noise in multivariate GNSS position time-series," Journal of Geodesy, vol. 83, no. 2, pp. 175-187, 2009.
- [20]A. J. J. o. G. R. S. E. Amiri-Simkooei, "On the nature of GNSS draconitic year periodic pattern in multivariate position time series," vol. 118, no. 5, pp. 2500-2511, 2013.
- [21]B. Tahmasebi, A. R. Amiri-Simkooei, M. Dehghani, and M. Momeni, "Evaluation of Noise in **Deformation** Time Series Extracted by Small Baseline Interferometry," Journal of (in eng), Geomatics Science and Technology, Research vol. 4, no. 4, 83-92, pp. 2015.(persian)
- [22]Z. Lu and D. Dzurisin, "InSAR imaging of Aleutian volcanoes," in InSAR imaging of Aleutian volcanoes: Springer, 2014, pp. 87-345
- [23]S. Li, W. Xu, and Z. Li, "Review of the SBAS InSAR Time-series algorithms, applications, and challenges," Geodesy and Geodynamics, 2021.
- [24]Y. Fialko, M. Simons, and D. Agnew, "The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7. 1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations," Geophysical research letters, vol. 28, no. 16, pp. 3063-3066, 2001.
- [25]J. O. Ogundare, Understanding least squares estimation and geomatics data analysis. John Wiley & Sons, 2018.
- [26]J.-P. Montillet and M. S. Bos, Geodetic time series analysis in earth sciences. Springer, 2019.
- [27]J.-P. Montillet, S. Williams, A. Koulali, and S. McClusky, "Estimation of offsets in GNSS time-series and application to the detection of earthquake deformation in the far-field," Geophysical Journal International, vol. 200, no. 2, pp. 1207-

[DOI: 10.61186/jgit.11.1.37

محسن زینل پور و همکار ان

1221, 2015.

- [28]A .Amiri-Simkooei, M. Hosseini-Asl, J. Asgari, and F. Zangeneh-Nejad, "Offset detection in GNSS position time series using multivariate analysis," GNSS solutions, vol. 23, no. 1, pp. 1-12, 2019.
- [29]Dong, Danan, et al. "Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series." Journal of Geophysical Research: Solid Earth 107.B4 (2002): ETG-9.
- [30]S. J. J. o. G. Williams, "The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series," vol. 76, no. 9-10, pp. 483-494, 2003.
- [31]A. Amiri-Simkooei, "Least-squares variance component estimation: theory and GNSS applications," 2007.
- [32]USGS."Kilauea Volcano." USGS. https:// www. usgs.gov/ volcanoes/kilauea (accessed 8/20/2022, 2022).
- [33]Google Earth."Hawwaii Islands." Google Earth. https://earth.google.com (accessed 8/20/2022, 2022).
- [34]Y. Morishita, M. Lazecky, T. J. Wright, J. R. Weiss, J. R. Elliott, and A. Hooper, "LiCSBAS: An open-source InSAR time series analysis package integrated with the LiCSAR automated Sentinel-1 InSAR processor," Remote Sensing, vol. 12, no. 3, p. 424, 2020.
- [35]USGS." earthquakes." USGS. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/m ap (accessed 7/11/2022, 2022).
- [36]Tomás, Roberto, et al. "Using wavelet tools to analyse seasonal variations from InSAR time-series data: a case study of the Huangtupo landslide." Landslides 13 (2016): 437-450.
- [37]Reinosch, Eike, et al. "InSAR time series analysis of seasonal surface displacement dynamics on the Tibetan Plateau." The

Cryosphere 14.5 (2020): 1633-1650.

[38]G. Blewitt, W. C. Hammond, and C. Kreemer, "Harnessing the GNSS data explosion for interdisciplinary science," Eos, vol. 99, no. 10.1029, p. 485, 2018.

Journal of Geospatial Information Technology Vol.11, No.1, Spring 2023

Research Paper

Filtering Radar Interferometry Time Series with Univariate Least Squares Noise Matrix Analysis

Mohsen Zeynalpour¹, Hamid Mehrabi^{2*}, Ali Reza Amiri-simkooie³

1- Ms.c of geodesy, Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan

2-Assistant professor, Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan

3- Professor, Department of Geomatics, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan

Abstract

Human life is always affected by various natural events such as earthquakes, volcanoes, subsidence, etc. One of the suitable tools for investigating and analyzing these hazards is synthetic aperture radar interferometry. This geodetic technique has the capability of resolving the displacement of the Earth's crust and analyzing the deformation through phase differences of radar images. The main advantage of the InSAR is the high temporal and spatial resolution. Analogous to the other geodetic methods, the accuracy of the result depends on the modeling of observational disturbances and noises. Despite the progress in recent decades, these disorders have received little attention. The case study is the northwest of Hawaii Island. In this study, filtering and reducing the turbulence in time series is based on the most appropriate functional model and stochastic model. This process is done using the MLE test. In this study, functional models include trend, cyclic, and offset. The statistical models also include white noise, flicker, and random walk, whose components are identified through univariate least squares noise analysis. The time series are reproduced through the best functional and statistical models. The results indicate that the best model is the linear trend with the presence of cyclic, offset, and white noise for all pixels. By implementing the univariate least squares noise analysis method, the accuracy of the results improved on average by 43%. In addition, applying both high-pass and low-pass filters resulted in an average improvement of 28%.

Key words: Time series of radar interferometry, univariate least squares noise analysis, high-pass and low-pass filters.

Correspondence Address: Department of Geomatics, Faculty of Civil and Transportation Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Tel: +98 31 37935297. Email: h.mehrabi@eng.ui.ac.ir