



جمهورى اسلامى ايران سازمان برنامهوبودجه كشور سازمان نقشهبرداری کشور

تهیه نقشههای فرونشست توسط تصاویر

ماهوارهای راداری

استاندارد/دستورالعمل شماره

آخرین ویرایش: ۱۴-۱۱-۱۴

http://www.ncc.gov.ir

سازمان نقشهبرداری کشور

اداره کل نظارت،کنترل فنی و

گروه استانداردسازی

استاندارد

بهمن ۱۴۰۳

تهیه و کنترل «.....» استاندارد/دستورالعمل شماره

اعضای گروه تهیه کننده: نام و نام خانوادگی: معصومه آمیغ پی نام محل کار: سازمان نام مدرک تحصیلی: دکتری عمران نقشه برداری نقشه برداری نام و نام خانوادگی: سیاوش عربی نام محل کار: سازمان نام مدرک تحصیلی: کارشناسی ارشد، نقشه برداری عمران نقشه برداری

اعضای گروه نظارت : نام و نام خانوادگی مريم دهقانى

مهرنوش امتى

نام محل کار دانشگاه شیراز سازمان نقشه برداری

نام مدرک تحصیلی دکتری سنجش از دور دکتری سنجش از دور

اعضای گروه هدایت و راهبری:

نام و نام خانوادگی علی صفایی

مريم صارمي

نام محل کار سازمان نقشه برداری

سازمان نقشه برداری

نام مدرک تحصیلی کار شناسی ار شد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی کار شناسی ار شد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی

	فهرست
۱	فصل اول
۳	فصل اول: مقدمه
v	فصل دوم تداخل سنجی راداری
۷	۲-۱ تاریخچه تداخل سنجی راداری
۸	۲-۲ تصاویر راداری
1+	۲-۳ هندسه تصویربرداری راداری
11	۲-۴ قدرت تفکیک مکانی تصاویر راداری
١٣	۲-۵ رادار با دریچه مصنوعی
14	۲–۶ دامنه و فاز در تصاویر راداری
10	۲-۷ تداخل سنجی راداری
11	۲-۷-۲خط مبنای مکانی
١٨	۲-۷-۲خط مبنای زمانی
١٨	۲-۷-۲خط مبنای ترکیبی
١٨	۲-۷-۴همبستگی تصاویر
1	۲–۸ تداخل سنجی راداری تفاضلی
19	۲-۸-۱نقشه تغییرات
19	۲-۸-۲ تئوری و الگوریتم
۲۳	۲-۸-۳سیستمهای تهیه نقشه تغییرات با تداخل سنجی
ﻪ ﺗﻐﯿﯿﺮ)	۲-۸-۴مراحل استخراج تغییرات ارتفاع از فاز تصویر(تهیه نقش
۲۷	۲-۸-۵عوامل موثر بر دقت تغییرات ارتفاعی
۲۸	۲-۸-۶کاربردهای تداخل سنجی راداری
۲۸	۲-۹روش بازپراکنش کنندههای پایدار
کنندههای پایدار و خط مبناهای کوتاه ۳۳	۲-۱۰ تحلیل سری زمانی با استفاده از تلفیق باز پراکنش

فصل سوم استخراج میدانهای ج
۳-۱۱ندازهگیری جابجایی سهبعد
فصل چهارم محاسبات سری زما
۴-۱آنالیز سری زمانی به روش ک
۴–۲مطلق سازی و صحت سنجے
۴-۳ تفسير نتايج فرونشست به
فصل پنجم: گزارش نهایی و ارائه
۵-۱گزارش تصاویر راداری استف
۵-۲گزارش پردازش تصاویر
۵-۳گزارش نتایج۵

فهرست اشکال و تصاویر

۹	شکل۲-۱ طیف امواج الکترومغناطیس که در رادار استفاده می شود
11	شکل ۲-۲ هندسه تصویر راداری
١٢	شکل ۲-۳ قدرت تفکیک مکانی آزیموتی
17	شکل ۲-۴ قدرت تفکیک مکانی برد
نوسط آنتن با طول مصنوعی B دریافت	شکل ۲-۵ رادار با دریچه مصنوعی، سیگنالها طوری پردازش میشوند که گویا :
۱۳	شدەاند
14	شکل ۲-۶ تصویر مختلط راداری، الف) دامنه تصویر، ب) فاز تصویر
م	شکل ۲-۷ اینترفراگرام بهدستآمده از پردازش تصاویر راداری در منطقه زلزله ب
١٧	شکل ۲-۸ هندسه تداخل سنجی
۲۵	شکل ۲-۹ مراحل استخراج تغییرات ارتفاع از فاز تصویر
۲۷	شکل ۲-۱۰ مراحل بازیابی فاز
دارند، الف: پیکسل بدون پراکنش کننده	شکل ۲-۱۱ پراکنش کننده¬هایی که در مقدار فاز برگشتی از پیکسل شرکت ه
۲۹	پايدار، ب: پيكسل داراى پراكنش كننده پايدار [۱۶]
, خط مبنا كوتاه. دايره⊂ها نشاندهنده	شکل ۲-۱۲ نمایش خط مبناها برای الف: روش پراکنش کننده ثابت، ب- روش
۳۳	تصاویر و خطوط نمایش اینترفروگرام ۲های تشکیل شده است [۱۷]

	فهرست جداول
۲۳	جدول ۲-۱ سیستمهای ماهوارهای مناسب برای تکنیک تداخل سنجی

:

فصل اول



بعد از عنوان فصل صفحه خالی

فصل اول: مقدمه

فرونشست سطح زمین، کاهش تدریجی ارتفاعی سطح زمین در اثر دخالتهای انسانی مانند استخراج بی رویه آبهای زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، فعالیتهای معدنی و یا ناشی از پدیدههای تکتونیکی می باشد. به علت عدم مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، مناطق مختلفی از جهان با فرونشستهای گسترده مواجه شده است. در ایران نیز عدم سازگاری با اقلیم کشور و برداشت بی برنامه از منابع آب زیرزمینی از یک و پیامدهای جهانی تغییر اقلیم از دیگر سو موجب فرونشست زمین در مناطق متعددی از کشور شده است. شناسایی مناطق فرونشست و طبقه بندی آنها از لحاظ وسعت و نرخ جابجایی نخستین گام در جهت مدیریت این مخاطره می باشد. ژئودزی، علم تعیین شکل، ابعاد و میدان ثقل زمین و بررسی تغییرات زمانی آن می باشد. بررسی تغییرات سطح زمین، می تواند به عنوان پیش نشانگر حوادث مهیبی همچون زلزله و آتشفشان و یا برای شناخت و کنترل فرونشست، نقش مهمی در مدیریت بحران داشته باشد. بدین منظور در دهههای اخیر، تلاش گستردهای به منظور اندازه گیری میدان جابجایی پوسته زمین توسط مشاهدات ژئودتیکی همچون ترازیایی دقیق، GPS و تداخل سنجی انجام شده

ترازیابی دقیق بهعنوان قدیمی ترین تکنیک اندازه گیری ارتفاع و اختلاف ارتفاع، جابجایی ارتفاعی سطحی زمین را با دقت بالا اندازه گیری می کند؛ اما با محدودیتهایی مانند قدرت تفکیک مکانی و زمانی پایین و هزینه بالا و زمان بر بودن مواجه است. مشاهدات پیوسته GPS نیز با دو ویژگی قدرت تفکیک مکانی پایین، ولی قدرت تفکیک زمانی بالا مطرح است.

با پرتاب ماهوارههای راداری، امکان بررسی تغییر شکل پوسته زمین با دقت مناسب فراهمشده است. تکنیک تداخل سنجی راداری، در چند دهه اخیر تکنیک متداولی برای اندازه گیری تغییرات سطح زمین گردیده است. پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این تکنیک را بهعنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیدههای مختلف زمین شناسی همچون زلزله، فرون شست، زمین لغزش و ... مطرح کرده است. دقت میدان جابجایی به دست آمده از تکنیک تداخل سنجی راداری، وابسته به عواملی همچون نوع منطقه، نوع تصاویر و تعداد آنها، نرم افزار استفاده شده، روش مورد استفاده و می باشد و محدوده دقت نتایج می تواند بین چند میلیمتر تا یک سانتیمتر و در برخی موارد بیشتر متغیر باشد. یکی از محدودیتهای تکنیک تداخل سنجی راداری، امکان اندازه گیری جابجایی در راستای خط دید ماهواره میباشد. بهمنظور حل این مشکل، تلاشهایی در جهت استخراج میدان جابجایی سهبعدی از تصاویر راداری صورت پذیرفته است.

در مجموعه حاضر مشخصات فنی و دستورالعمل نحوه تهیه نقشه فرونشست با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری ارائهشده است.

فصل دوم

۶

تداخل سنجي راداري

فصل دوم تداخل سنجى رادارى

امروزه تکنیک تداخل سنجی راداری^۱ بهعنوان یک تکنیک متداول برای اندازه گیری تغییر شکل سطحی پوسته زمین شده است. پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این تکنیک را بهعنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده های مختلف زمین شناسی همچون زلزله، فرون ست، زمین لغزش و … مطرح کرده است. تکنیک تداخل سنجی راداری جابجایی سطح زمین را باقدرت تفکیک مکانی چند متر در منطقه ای به وسعت بیش از ۴۰۰۰۰ کیلومتر مربع با دقت زیر سانتی متر اندازه گیری می کند. همچنین با پرتاب ماهواره 1-sentine امکان برآورد جابجایی در بازه زمانی ۱۲ روز فراهم شده است.

۱–۲ تاریخچه تداخل سنجی راداری

اولین گزارش از به کار گیری تکنیک تداخل سنجی راداری برای تهیه نقشه از یک سیاره بود. رودگرز و اینگالز در ۱۹۶۹ از یک سیستم داپلر- برد برای تهیه نقشه ونوس استفاده کردند[۱]. پسازآن، زیسک در ۱۹۷۲ از تداخل سنجی برای تولید یک نقشه ارتفاعی از ماه استفاده کرد[۲]. استفاده زمینی از یک سیستم رادار با دریچه مصنوعی هوایی با تداخل سنجی برای تولید منحنی میزانهای ارتفاعی اولین بار توسط گراهام در ۱۹۷۴ گزارش شد[۳]. این تکنیک بعدا توسط زبکر و گلد اشتاین توسعه داده شد که تکنیکهای تحلیل رقومی را برای بیان یک اینترفراگرام با استفاده از دو تصویر مختلط^۲با ترکیب اینترفراگرامهای مضاعف به کار گرفتند[۴]. با ترکیب اینترفراگرامهای مضاعف گابریل و همکاران اثبات کردند که تداخل سنجی تفاضلی برای تعیین جابجایی سطح زمین در حد سانتیمتر میتواند استفاده شود[۵]. پیشرفتهای اخیر، شامل استفاده از تداخل سنجی راداری ماهوارهای برای مطالعه پدیدههای دینامیکی است. اولین نقشه جابجایی زلزله توسط مسونت و دیگران در ۱۹۹۳ ارائه شد که یک

V

اینترفراگرام رادار با دریچه مصنوعی را با یک مدل ارتفاعی رقومی ترکیب کرده بودند [۶]. تصویرهای راداری که برای ایجاد اینترفراگرام استفادهشده بودند، قبل و بعد زلزله گرفتهشده بودند. با حذف اثر توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، جابجایی زلزله در راستای خط دید ماهواره نمایش داده می شد.

با ترکیب سه تصویر راداری بهعنوان دو جفت اینترفراگرام، زبکر و همکاران در ۱۹۹۴ توانستند اثر توپوگرافی و دینامیکی را جدا کنند و میدان جابجایی را تنها با استفاده از دادههای راداری استخراج کنند. همچنین آنها نتایج خود را با اطلاعات مثلثبندی و GPS مقایسه کردند[۷]. املونگ و همکاران در ۱۹۹۹ نقشه فرونشست لس وگاس را با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری به دست آوردند[۸].

مطالعات تداخل سنجی راداری پس از پرتاب ماهوارههای I-ERS و ERS-2 که دادههای موردنیاز تداخل سنجی را با فاصله زمانی یک روز فراهم می کردند، توسعه یافت. پس از آن تحقیقات علمی مختلفی با پرتاب ماهواره COSMO-،RADARSAT،ALOS مطرح شد. پس از آن ماهوارههای مختلفی همچون COSMO-،RADARSAT،ALOS در بازههای زمانی TerraSAR-X ،Skymed و I-Ielia با طول موجهای مختلف و باقابلیت تصویربرداری در بازههای زمانی کوتاه تر و پوشش وسیع تر و قدرت تفکیک مکانی متفاوت پرتاب شد که قابلیت اندازه گیری میدان جابجایی سطحی زمین توسط تکنیک تداخل سنجی راداری گسترده تر شده است. همچنین روشهای طول خط مبنای کوتاه و روش

۲-۲ تصاویر راداری

رادارها در قسمت مایکرویو طیف الکترومغناطیس، بالای مناطق مرئی و مادون قرمز حرارتی کار می کنند. رادارهای تصویربرداری شامل طول موجهای 1mm-1m هستند. کار در محدوده مایکرویو طیف الکترومغناطیس نفوذ سیگنال را مخصوصا برای اتمسفر بهبود داده است (شکل۲–۱).

Л



9

شکل ۲۰۰ طیف امواج الکترومغناطیس که در رادار استفاده می شود [۱۰].

رادارها تنوعی از خصوصیات ارزشمند برای دانشمندان علوم زمین دارند. رادار یک سنجنده فعال است، یک سیگنال انرژی الکترومغناطیسی را انتقال میدهد، زمین را روشن میکند و پاسخ بازگشتی از سطح را اندازه گیری میکند. بنابراین رادارها مستقل از انرژی خورشید هستند و قادر به تصویربرداری در تمام طول شبانهروز هستند. از دیگر سو، رادارهای تصویربرداری به خاطر طول موج بلند قادر به تصویربرداری در تمام شرایط آبوهوایی (ابری و ...) هستند.

۲-۳ هندسه تصویربرداری راداری

جهت حرکت سنجنده، جهت آزیموت و جهت عمود بر حرکت سنجنده، جهت برد نامیده می شود. همان طور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است، برد نزدیک، نزدیکترین قسمت عرض تصویر به خط نادیر است. برد دور،^۲ دورترین قسمت عرض تصویر به خط نادیر است. عرض گذر،^۳ فاصله بین دو برد دور و برد نزدیک است. برد مایل، فاصله سنجنده تا هدف در جهت برد است. زاویه دید^۵ زاویه بین خط نادیر و برد مایل (خط دید) است. فاصله برد زمینی،^۶ تصویر فاصله مایل روی زمین است. زاویه برخورد^۷ زاویه بین اشعه رادار و خط عمود بر سطح زمین است.

¹Near range ¹Far range ¹Swath wi dth ¹Sl ant range ²Look angl e ²Ground range ¹i nci dent angl e ¹Depressi on angl e





۴-۲ قدرت تفکیک مکانی در تصاویر راداری در دو جهت موردبحث قرار می گیرد: جهت حرکت سنجنده (جهت آزیموت) قدرت تفکیک مکانی در تصاویر راداری در دو جهت موردبحث قرار می گیرد: جهت حرکت سنجنده (جهت آزیموت) (شکل ۲-۳) و جهت عمود بر حرکت سنجنده (جهت برد) (شکل ۲-۴).
 ۱- قدرت تفکیک مکانی در راستای آزیموت: قدرت تفکیک مکانی در امتداد مسیر حرکت (آزیموت) یک سیستم رادار با دریچه حقیقی¹تابعی از نسبت طول موج به طول آنتن است. هرچه نسبت طول موج به طول آنتن کمتر باشد، قدرت تفکیک مکانی زمینی زمینی زمینی در بهتر است. قدرت تفکیک مکانی زمینی زمینی ایشد، قدرت تفکیک مکانی در می توارد می توارد این کمتر باشد، قدرت تفکیک مکانی زمینی آزیموتی طبق رابطه زیر به دست می آید[۱۰]:

$$A_R = \frac{H\lambda}{l\cos\varphi}$$

'Real aperture radadr (RAR)

که در رابطه فوق λ طول موج، H ارتفاع سنجنده، lطول آنتن و arphi زاویه تابش رادار است.



شکل ۰-۳ قدرت تفکیک مکانی در راستای آزیموت آزیموتی [۱۰].

در شکل (۲–۳) که بیانگر قدرت تفکیک مکانی در راستای آزیموت است، اشیای ۱ و ۲ قابل تفکیک هستند، ولی ۳ و ۴ بهعنوان یک شی به نظر میرسند. ۲- قدرت تفکیک مکانی در راستای برد: قدرت تفکیک درجهت عمودبر حرکت سنجنده متناسب با عرض پالس انتقال یافته است، بنابراین پالسهای باریک، قدرت تفکیک مکانی خوبی در راستای برد ایجاد میکنند. (۲–۲)

$$G_r = \frac{c\tau}{2\sin\varphi}$$

 φ زاویه و auعرض پالس (مدت زمانی که پالس به صورت انرژی ارسال می شود) که در رابطه بالا c سرعت انتقال ϕ پالس که همان سرعت نور است، می باشد.



شکل ۰-۴ قدرت تفکیک مکانی برد [۱۰].

شکل (۲-۴) بیانگر قدرت تفکیک مکانی در راستای برد است که اشیای ۴ و ۳ قابل تفکیک هستند، ولی ۲ و ۱ بهعنوان یک شی به نظر میرسند. رابطه عرض پالس و زاویه و سرعت انتقال پالس با این توان تفکیک در این شکل دیده می شود.

۵-۲ رادار با دریچه مصنوعی^۱

رادار با دریچه مصنوعی با اندازه گیری تأخیر سیگنال (برد) و تعیین تاریخ داپلر اهداف، موقعیت اهداف را در دو بعد تجزیه می کند. همان طور که در معادله (۲–۱) دیده می شود، قدرت تفکیک مکانی تصاویر راداری با دریچه حقیقی در راستای آزیموت با ارتفاع سنجنده متناسب است و بنابراین برای ماهواره با ارتفاع بالا بزرگ می شود. در رادار با دریچه مصنوعی با استفاده از اثر داپلر، رادار داده را طوری پردازش می کند که گویا این داده توسط آنتن فیزیکی بزرگی جمع آوری شده است و بدین ترتیب به قدرت تفکیک مکانی خوبی می توان رسید و می توان بر مشکل وابستگی ارتفاعی توان تفکیک آزیموتی فائق گردید (شکل ۲–۵). در سیستم های رادار با دریچه مصنوعی رزولوشن تنها به طول آنتن (در صورت استفاده از تمام ظرفیت آنتن مجازی) بستگی دارد.



شکل ۵-۰ رادار با دریچه مصنوعی، سیگنالها طوری پردازش میشوند که گویا توسط آنتن با طول مصنوعی B دریافت شدهاند [۱۰].

با این تکنیک قدرت تفکیک مکانی در جهت آزیموت هزار برابر بهبود می یابدکه مثل آن است که از یک آنتن تصویربرداری به طول ۲۰ کیلومتر استفاده کرده باشیم[۱۱].

۲-۶ دامنه و فاز در تصاویر راداری

تصاویر راداری دارای مقادیر مختلط می باشند و بنابراین شامل اطلاعات دامنه وفاز هستند (شکل ۲-۶). روابط فاز و دامنه طبق معادلات زیر از تصویر استخراج می شود:

$$\varphi = \arctan(\frac{\mathrm{Im}}{\mathrm{Re}}) \tag{(7-7)}$$

 $a = \sqrt{\mathrm{Im}^2 + \mathrm{Re}^2} \tag{(f-t)}$



دامنه تصاویر، نشانگر سطح جاروب شده توسط رادار است. یک دریاچه آرام در تصویر راداری سیاه به نظر میرسد، زیرا سطح آب بهعنوان یک منعکس کننده^۱کامل عمل کرده و سیگنال تابیدهشده را کاملاً از ماهواره دور می کند. فاز برای هر پیکسل، وابسته به فاصله زمین تا ماهواره، تاخیرفاز دراتمسفر، جابجایی سطح زمین و شیفت فاز در اثر برخورد به سطح زمین است. هر پیکسل شامل صدها المان است که هرکدام ضریب انعکاس مختلط متفاوتی داشته و درنتیجه شیفت متفاوتی درفاز دراثر برخورد سیگنال به آنها ایجاد میکنند. فاز پیکسل مجموع صدها عدد مختلط مجهول است که به این شیفت فازها بستگی دارد، بنابراین فاز تصاویر به صورت مقادیر تصادفی است. درهرصورت تفاضل فازهای دو تصویر که در هندسهای مشابه از یک منطقه گرفته شدهاند می تواند این قسمت تصادفی را جدا کند. بنابراین با مقایسه تصاویر راداری که از یک منطقه گرفته شده است، می توان اطلاعات مفید را استخراج نمود. تداخل سنجی راداری بر مبنای این مقایسه پایه نهاده شده است.

۲–۷ تداخل سنجی راداری

تداخل سنجی راداری با تفاضل فازهای دو تصویر گرفته شده از یک صحنه اختلاف ارتفاع منطقه را استخراج می کند و به این ترتیب مدل رقومی زمین را با صحت چندین ده متر به دست می آورد[۱۲]. تفاضل فازهای دو تصویر، نوع جدیدی از تصویر است که اینترفراگرام نامیده می شود. اینترفراگرام، یک طرح تداخلی از فرینج، شامل اطلاعات هندسه نسبی منطقه است. (شکل ۲–۷). هر فرینج یک طیف کامل رنگی و نشان دهنده تغییر فاز در بازه [۰٫ 2π] می باشد که جابجایی در هر فرینج برابر نصف طول موج رادار می باشد.

¹Interferometric Synthetic Aperture radar (InSAR) ^{*}fri nge



شکل ۲۰۰ اینترفراگرام بهدست آمده از پردازش تصاویر راداری ناشی از توپوگرافی [۱۳].

۲-۷-۲ خط مبنای مکانی

فاصله بین مدار اول و مدار دوم در لحظه تصویربرداری دو تصویر راداری، خط مبنای مکانی نامیده می شود. اندازه گیری اصلی تخمین ارتفاع از موقعیتهای معلوم سکو است و فواصلی که از آنتن رادار تا تار گت اندازه گیری می شود ρ_2 و ρ_1 است. خط مبنای مکانی این امکان را فراهم می کند که ارتفاعات هدف را اندازه گیری کنیم و درنتیجه توپو گرافی زمین را به دست آوریم. همچنین خط مبنای عمودی، تصویر خط مبنا در جهت عمود بر جهت خط دید ماهواره و خط مبنای افقی تصویر خط مبنا در جهت خط دید ماهواره می باشد.



شکل ۸-۰ هندسه تداخل سنجی

وقتی رادار منطقه را از دو مکان متفاوت مشاهده می کند، توپو گرافی منطقه منجر به تولید فرینجهایی (مانند خطوط تراز) در اینترفراگرام می شود. تغییر ارتفاعی که موجب تولید یک فرینج می شود را ارتفاع ابهام ^۱می نامیم که با رابطه زیر به دست می آید [۱۴] و بیانگر توان رادار برای اندازه گیری ارتفاع است که برای تولید مدل رقومی زمین استفاده می شود:

$$h_{a} = \frac{R_{s}\lambda\sin\theta_{m}}{2d}$$

$$(\Delta - \Upsilon)$$

که در رابطه بالا λ طول موج رادار، R_s فاصله مسیر دومی تا تارگت، d خط مبنای عمودی، $heta_m$ زاویه برخورد م تصویر مرجع میباشد.

¹ height of ambiguity

۲-۷-۲ خط مبنای زمانی

خط مبنای زمانی محض، فرض می کند که یک اندازه گیری راداری که از مسیرهای کاملاً یکسان گرفته شده است، در زمان تکرار می شود. اصل اساسی این خط مبنا این است که با موقعیت های اخذ داده یکسان، داده تداخل سنجی با تغییر در منظره مشاهده شده متناسب است.

۲-۷-۳ خط مبنای ترکیبی

وقتی خط مبنای ترکیبی یعنی هم خط مبنای مکانی و هم خط مبنای زمانی بین تصاویر موجود باشد، هر دو سیگنال جابجایی و توپوگرافی در اینترفروگرام وجود دارد و اگر هدف اندازه گیری جابجایی باشد باید به طریقی مانند استفاده از مدل رقومی ارتفاعی منطقه اثر توپوگرافی حذف شود تا اندازه گیری جابجایی امکان پذیر باشد.

۲–۷–۲ همبستگی تصاویر واریانس فاز تداخلی که بیانگر میزان همبستگی فاز تصاویر است، با رابطه زیر تعیین میشود. (۶–۲) $\gamma(t) = \frac{\langle c_1 c_2^*}{\sqrt{\langle c_1 c_1^*} \rangle} \cong \frac{\sum c_1 c_2^*}{\sqrt{\sum c_1 c_1^*} \sum c_2 c_2^*}} \cong \frac{\langle c_1 c_2^*}{\sqrt{\sum c_1 c_1^*} \sum c_2 c_2^*}}$ کاربردهای تصویر همبستگی در بررسی کیفیت اینترفراگرام (از حیث نویز دار بودن)، ثبت هندسی 'تصاویر، در

مرحله بازیابی فاز و همچنین طبقهبندی سطح زمین (آب، گیاه، ساختمان) است.

۲-۸ تداخل سنجی راداری تفاضلی

با استفاده از تداخل سنجی تفاضلی میتوان تغییرات سطح زمین را برآورد کرد. هدف این تکنیک، جداسازی سهم فاز توپوگرافی سطح زمین و سهم فاز جابجایی آن برای نشان دادن میدان جابجایی است. برای حذف سهم فاز توپوگرافی به یک اینترفرگرام دیگر و یا دسترسی به مدل ارتفاعی رقومی زمین نیاز داریم. با این تکنیک به صحت در حد میلیمتر یا سانتیمتر برای سرعت تغییر شکل زمین میتوان دست پیدا کرد.

۲–۸–۱ نقشه تغییرات

تهیه نقشه مدل رقومی زمین با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری با تصاویر راداری دارای خط مبنای مکانی و زمانی انجام میشود. وقتی خط مبنای مکانی بهقدر کافی کوچک باشد (درحدچندمتر)، پردازش تداخل سنجی راداری نقشه جابجایی ایجادشده در منطقه را ایجاد میکند. ولی وقتی خط مبنای مکانی قابل توجه باشد، مدل رقومی زمین برای برداشتن اثر توپوگرافی منطقه و به دست آوردن تغییرات منطقه نیاز است.

۲-۸-۲ تئوری و الگوریتم

در این قسمت معادلات موردنیاز برای محاسبه میدان جابجایی زمین با استفاده از اندازه گیریهای رادار با دریچه مصنوعی وقتی سهم فاز توپو گرافی منطقه و اثرات جابجایی قابل توجه است، به دست می آید. وقتی یک اینترفرا گرام از تفاضل فازهای دو تصویر به دست آمد، فاز تداخل سنجی به صورت زیر تعریف می شود [۱۴]:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \rho(\rho_2 - \rho_1) \tag{V-Y}$$

که اگر آنتن فرستنده سیگنال برای همه کانالها یکی باشد، p=1 و اگر هر کانال آنتن فرستنده و گیرنده خود را داشته باشد (برای تداخل سنجی با مسیر تکراری)، p=2 میباشد. از طرفی داریم:

$$\delta \rho \cong -B \sin(\theta - \alpha)$$
 (۸-۲)
 $= -B_{||}$ مولفه خط مبنا در جهت موازی با خط دید است؛ که با در نظر گرفتن رابطه (۲-۷) و (۲-۸) برای تداخل
سنجی با مسیر تکراری خواهیم داشت:

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(\delta\rho) = -\frac{4\pi}{\lambda}B_{||}$$
(۹-۲)

اگر اینترفراگرام دومی از همان منطقه اخذ شود، طوری که یک مدار آن با زوج قبلی طوری مشتر ک باشد که θ

و ϕ ثابت بماند، فازهای این دو اینترفراگرام میتوانند با هم مقایسه شوند. این اینترفراگرام با ترکیب دو اندازه گیری

 ϕ و توجیه خط مبنای 'B دوم با یک خط مبنای متفاوت اخذشده است، بهطوری که داریم:
 $\frac{\phi'}{\phi} = \frac{B'_{||}}{B_{||}}$

اگر یک جابجایی سطحی (مثل زلزله) المانهای اینترفراگرام دوم را جابجا کرده باشد، با فرض اینکه این جابجایی ها دریک المان در حد بالایی وابستگی داشته باشند، طوری که انعکاسهای راداری وابستگی خود را حفظ کنند، در این مورد علاوه بر فاز وابسته به توپوگرافی، یک تغییر فاز درنتیجه جابجایی Δρ در جهت خط دید ماهواره ایجاد می شود. برای این اینترفراگرام داریم:

$$\phi' = \phi_1' - \phi_2' = \frac{4\pi}{\lambda} (\rho_2 + \Delta \rho - \rho_1) = \frac{4\pi}{\lambda} (-B_{||}' + \Delta \rho)$$
(11-Y)

اگر داده اینترفراگرام اول در نسبت مولفه های موازی خط مبنا ضرب و از اینترفراگرام دوم کم شود، به معادلهای که تنها وابسته به جابجایی سطح است، میرسیم: $\phi' - \phi \frac{B'_{||}}{B_{||}} = \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta \rho)$

- با توجه به نسبت خط مبناهای موازی:
- $\frac{B_{||}}{B_{||}} = \frac{\sin(\theta \alpha')}{\sin(\theta \alpha)} \tag{17-7}$

با معلوم بودن خط مبنای موازی از هندسه مدار (α, B) و توپوگرافی صحنه (θ) بردار جابجایی برای هر نقطه قابل محاسبه است. برای محاسبه رابطه (۲–۱۲) با استفاده مستقیم از رابطه (۲–۱۳) باید نقشه توپوگرافی منطقه در دسترس باشد. این کار مستلزم بازیابی فاز و تعیین فاز مطلق است. یک روش غیر مستقیم که توسط زبکر در ۱۹۹۴ ارائه شد[۱۵]، نقشه جابجایی را بدون استفاده از اطلاعات قبلی از منطقه استخراج می کند. ابتدا بخشی از فاز که حتی در غیاب توپوگرافی روی زمین وجود دارد، حذف می شود. فازی که نسبت به اثر زمین کروی اصلاح می شود طبق رابطه زیر به دست می آید:

$$\phi_{flat} = -\frac{4\pi}{\lambda} B(\sin(\theta - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha)) \tag{14-7}$$

که در این رابطه $heta_0$ زاویه دید برای هر نقطه در عکس با فرض داشتن یک ارتفاع مرجع محلی ثابت است. فاز اینترفراگرام پسازاین تصحیح نتیجه تغییر ارتفاعی نسبت به سطح مرجع کروی و جابجاییهای درنتیجه حرکت صحنه است.

با توجه به اینکه تفاوت heta واقعی از $heta_0$ کوچک است، با بسط رابطه (۲–۱۴) داریم:

$$\varphi_{flat} = -\frac{4\pi}{\lambda} B(\cos(\theta_0 - \alpha))\delta\theta$$
 (10-7)

اگر $\delta \theta = \theta - \theta_0$ باشد، φ_{flat} برابر ضرب مولفه عمودی خط مبنا، با این فرض که هیچ توپوگرافی روی سطح θ_{flat} θ_0 باشد، تابع θ_0 باشد، تابع θ_0 باشد، تابع θ_{flat} حالا بهجای اینکه تابع θ باشد، تابع θ_{flat}

است و تنها به هندسه مشاهده و خط مبنا وابسته است. برای اینترفراگرام دوم داریم:

$$\phi_{flat}' = -\frac{4\pi}{\lambda} B' \cos(\theta_0 - \alpha') \delta\theta + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho$$
(19-7)

بنابراین بیان دیگری از معادله فاز تفاضلی رابطه (۲–۱۲) برحسب فاز مسطح شده بهصورت زیر است: $\phi'_{flat} - \phi_{flat} \frac{B'\cos(\theta_0 - \alpha')}{B\cos(\theta_0 - \alpha)} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta \rho$

_

با این تابع، جابجایی
$$\Delta A$$
 مستقیماً بدون نیاز به مقدار دقیق θ به دست می آید.
اگر خط مبنایی که در عملیات مسطح سازی رابطه (۲–۱۴) استفاده می شود، درست نباشد، معادله (۲–۱۵) شامل
ترمهایی از خطا خواهد بود و نقشه جابجایی آن دارای خطا یا اعوجاج خواهد شد. بنابراین فاز اینترفراگرامها هم
به توپوگرافی محلی و هم به هر حرکتی که بین مشاهده ممکن است روی سطح زمین اتفاق بیافتد، وابسته است.
حساسیت اندازه گیری فاز به توپوگرافی و جابجایی می تواند با مشتق گیری رابطه (۲–۱۷) نسبت به ارتفاع و جابجایی
جساسیت اندازه گیری فاز به توپوگرافی و جابجایی می تواند با مشتق گیری رابطه (۲–۱۷) نسبت به ارتفاع و جابجایی
به دست آید، حساسیت ارتفاعی با رابطه زیر به دست می آید:
 $\frac{\partial \phi'}{\partial \theta} = \frac{4\pi}{\lambda} B' \cos(\theta_0 - \alpha')$
(۱۸–۲)
 $\frac{\partial \phi'}{\partial h} = \frac{4\pi}{\lambda} B' \cos(\theta_0 - \alpha')$
(۱۹–۲)
 $\frac{\partial \phi'}{\partial h} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B' \cos(\theta - \alpha')}{\rho \sin \theta}$
(۱۹–۲)
 $\frac{\partial \phi'}{\partial (\Lambda \rho)} = \frac{4\pi}{\lambda}$
(۲۰–۲)
 $\frac{\partial \phi'}{\partial (\Lambda \rho)} = \frac{4\pi}{\lambda}$
(۲۰–۲)
است. از معادله (۲–۱۹) و (۲–۲۰) واضح است که فاز به تغییرات سطح حساس تر است تا به توپوگرافی با صحت
است. از معادله (۲–۱۹) و (۲–۲۰) واضح است که فاز به تغییرات سطح حساس تر است تا به توپوگرافی با صحت
از آنجا که α خیلی بزرگتر از B است. بنابراین وقتی تداخل سنجی راداری برای اندازه گیری توپوگرافی با صحت

از انجا که
$$\rho$$
 خیلی بزرگتر از B است، بنابراین وقتی تداخل سنجی راداری برای اندازه گیری توپوگرافی با صحت
چند متر استفاده میشود، امکان تعیین جابجایی در حد میلیمتر یا سانتیمتر وجود دارد. این نسبت، حساسیت
قدرت تکنیک های تداخل سنجی را برای تعیین جابجایی های سطحی کوچک یا تغییر شکل معلوم می کند.
قدرت تکنیک های تداخل سنجی ابرای تعیین جابجایی های سطحی کوچک یا تغییر شکل معلوم می کند.
 $\frac{4\pi}{\lambda}\Delta\rho = 2\pi$
 $\Delta r = \frac{\lambda}{2}$

طبق رابطه اخیر جابجایی در یک فرینج برابر نصف طولموج میباشد، بنابراین با شمردن تعداد فرینجها و ضرب آنها در نصف طولموج، جابجایی سطح زمین محاسبه میشود.

۲-۸-۳ سیستمهای تهیه نقشه تغییرات با تداخل سنجی

در جدول ۱-۲ برخی سیستمهای ماهوارهای که تعداد زیادی از داده تداخل سنجی با مسیر تکراری (دوعبوره) را فراهم کردهاند، آمده است.

•	Historical Analysis				Today Monitoring				
1991 1991	1996	2001	2006	2011	2016	2021	2025	Revisit time (days)	Resolution (metre)
ERS-1/2-							X-band	35	28
RADARSAT-1						i 🛞	C-band	24	9
Envisat							L-band	35	28
ALOS-1							L-band	46	10
TerraSAR-X								11	0.3
COSMO-SkyMed								16 (1)	0.5
RADARSAT-2								24	1.6
RISAT-1							_	25	1
Kompsat-5						1		28	1
Sentinel-1A/B								12 (6)	5
ALOS -2					_			14	1
PAZ+TerraSAR-X						1		11 (4)	1
SAOCOM-1A/B								16 (8)	3
ICEYE								<1	0.4
RADARSAT Conste	llation Missi	on (RCM)						12 (4)	1
COSMO-SkyMed S	econd Gene	eration (CSG)						16 (8)	0.5
Capella								<1	0.3
StriX								1	1
NISAR								12	3
HRWS								-	0.25

جدول ۱-۰ سیستمهای ماهوارهای مناسب برای تکنیک تداخل سنجی[۱۶]

۲-۸-۴ مراحل استخراج بردار جابهجایی از فاز تصویر (تهیه نقشه تغییر) استخراج بردار جابهجایی از تصاویر راداری در ۶ مرحله صورت می گیرد (شکل ۲-۹). ابتدا دو تصویر نسبت به هم ثبت هندسی می شوند، در این مرحله خطاهای هندسی که مربوط به تفاوت موقعیت آنتن سنجنده حین تهیه تصویر از یک منطقه است، حذف میشود. سپس با ضرب مختلط این دو تصویر که ثبت هندسی شدهاند، فازهای پیکسلهای متناظر از هم کم میشود واینترفراگرام ایجاد میشود. در این مرحله، همچنین همبستگی دو تصویر محاسبه میشود. همبستگی دو تصویر، قابلیت اطمینان اندازه گیری فاز را اندازه می گیرد. فاز اینترفراگرام، شامل سهم فاز توپوگرافی و فاز تغییر سطح است. برای حذف اثر توپوگرافی و رسیدن به نقشه تغییرات، دو روش تداخل سنجی دو عبوری و تداخل سنجی سه عبوری وجود دارد.

در تداخل سنجی دو عبوری با استفاده از یک مدل رقومی ارتفاعی و هندسه مداری، اینترفراگرام دوم شبیهسازی شده ای تولید می شود و با تفاضل فازهای اینترفراگرامها به فاز ناشی از تغییر سطح می رسیم. در تداخل سنجی دو عبوری، نیازی به بازیابی اتوماتیک فاز نیست و شماره فرینجها از نقطه مرجعی با جابجایی معلوم به صورت دستی شمرده می شود، اما مدل ارتفاعی رقومی منطقه باید موجود باشد. صحت این روش وابسته به صحت مدل ارتفاعی رقومی منطقه و صحت خط مبنا است.

روش دیگر موسوم به روش تداخل سنجی سه مسیری یا تفاضل مضاعف، استفاده از سه تصویر و تولید دو اینترفراگرام و تفاضل فازهای این دو اینترفراگرام است. این روش به مدل رقومی زمین نیاز ندارد و تنها متکی به دادههای راداری است. ازآنجایی که بازیابی فاز کار آسانی نیست وامکن است منجر به خطاهایی شود، مخصوصا مکانهایی که فرینجها به هم فشرده و یا ناپیوسته هستند، چنین خطاهایی بهعنوان اطلاعات توپوگرافی نادرست در اینترفراگرام نهایی بازیابی میشوند و تشخیص آنها آسان نیست. برای اجتناب از تفسیر چنین نتایجی مناطق دشوار در اینترفراگرام حذف میشوند.





شکل ۲-۹ مراحل استخراج بردار جابهجایی از فاز تصویر

این روش براین فرض استوار است که جفت تصویری که برای تخمین توپوگرافی استفاده میشود، شامل هیچ تغییر شکلی نیست و منطقه بین دو اخذ داده ثابت بوده است. بنابراین، این روش برای جابجاییهای تدریجی قابلاستفاده نیست. علاوه براین یک اینترفراگرام همیشه شامل اثر اتمسفر است که این اثر اتمسفری نیز درصورتی که حذف نشود، بهعنوان تغییر ارتفاعی در نظر گرفته میشود و در تخمین مدل رقومی ارتفاعی خطا ایجاد خواهد کرد. مشکل دیگر این روش آن است که احتمال یافتن سه تصویر که باهم وابستگی داشته باشند، کمتر از یافتن دو تصویر است. پس از حذف اثر توپوگرافی، فاز اینترفراگرام، مضارب صحیح سیکل فاز را ندارد، برای محاسبه تغییر شکل ما باید مقدار مطلق فاز را از فاز اندازه گیری شده در اینترفراگرام بازیابی کنیم. در اغلب موارد مناطق با همبستگی پایین و نویز بالا موجب دشوار شدن این مرحله میشوند. دو روش اصلی برای بازیابی فاز موجود است: خطوط برش^۱و روش کمترین مربعات^۲که هرکدام برای کاربردهای خاصی مناسب است. هر دو الگوریتم ابتدا گرادیان میدان فاز را اندازه گیری کرده، سپس انتگرال می گیرد تا به فازهای بازیابی برسد (شکل ۲–۱۰).

درروش خطوط برش که یک روش محلی است، بازیابی به صورت پیکسل به پیکسل انجام می شود. در این روش ابتدا باقی مانده ها^۳در اینترفراگرام شناسایی شده و به یکدیگر متصل می شوند، سپس بازیابی فاز در اطراف این خطوط بدون عبور از آنها توسط خطوط برش انجام می شود. این روش از انتشار خطا جلوگیری می کند و ناساز گاریهای فاز را جدا می کند، اما انتخاب مکان صحیح خطوط برش دشوار است.

درروش کمترین مربعات اختلاف گرادیان فازهای نهان شده و بازیابی شده در کل تصویر مینیمم می شود. این روش به مسیر وابسته نبوده و قابل اطمینان تر است، سرعت بالاتری دارد و پوشش کاملی فراهم می کند، اما موجب ایجاد اعوجاج در پیرامون ناساز گاریهای فاز می شود.

> branch cut[`] Least square^r resi due^r

شکل ۰-۱۰ مراحل بازیابی فاز

نهایتاً پس از حذف اثر توپوگرافی و بازیابی فاز، تصاویر زمین مرجع شده و مختصاتهای کارتزین روی بیضوی به سیستم زمینی تبدیل میشوند.

۲-۸-۵ عوامل مؤثر بر دقت بر آورد جابجایی

پارامترهای مؤثر بر دقت ارتفاعی استخراجشده از اینترفراگرام، صحت خط مبنا و فاز است. خطا در وضعیت خط مبنا (پارامترهای مداری)، موجب ایجاد خطای سیستماتیک در فاز اینترفراگرام می شود که در کل مدل یکسان است و با تعدادی نقطه کنترل قابل حذف است. از دیگر منابع ایجاد خطا در اینترفراگرام، خطای فازاست که رفتار تصادفی داشته، ناشی از نویزهای گرمایی، ثبت غیردقیق دو تصویر، خطای بازیابی فاز، خطای کاهش همبستگی دو تصویر (به علت فاصله زمانی و مکانی دو تصویر) است. این خطا با فیلتر کردن و انجام آنالیز چندمنظره^۱تا حدودی کاهش می یابد.

'multi looking

از آنجاکه اتمسفر محیط همگنی نیست، موجب ایجاد شیفت اضافهای در فاز اندازه گیری شده می شود. با استفاده از آنالیز سری زمانی متداول و یا مبتنی بر پراکنش کننده های پایدار ^اقادر به کاهش اثر اتمسفر در نتایج خواهیم بود. همچنین می توان با استفاده از مدلهای اتمسفری موجود این خطا را از مشاهدات حذف نمود.

۲-۸-۶ کاربردهای تداخل سنجی راداری

نقشه میدان جابجایی سطح زمین بهدست آمده از تکنیک تداخل سنجی راداری، در مدیریت بلایای طبیعی مانند زلزله، آتشفشان، فرونشست، زمین لغزش و… کاربرد وسیعی پیدا کرده است. استفاده از تداخل سنجی راداری برای پیشگیری و مدیریت بحرانهای سوانح طبیعی در ایران نیز موردتوجه قرار گرفته است [۱۷ و ۱۹و۹۹و ۲۰و۲۱ و ۲۲

۲-۹ روش باز پراکنش کنندههای پایدار

در مناطقی که مولفه جابجایی سطحی زمین کم بوده و نیز تصاویر راداری دچار عدم همبستگی زمانی شوند، نمی توان از تکنیک تداخل سنجی راداری متداول استفاده نمود. روش باز پراکنش کنندههای پایدار در مناطقی که تصاویر دچار عدم همبستگی زمانی می شوند و همچنین دادههای راداری از نقطه نظر طول خط مبنای مکانی و زمانی دارای توزیع نامناسبند، استفاده می شود. همچنین به کمک این روش می توان دقت اندازه گیری جابجایی سطح زمین را از طریق بر آورد مولفه های مختلف خطا همچون خطای اتمسفری و توپو گرافی بهبود داد. تکنیک باز پراکنش کنندههای پایدار تعمیم تکنیک تداخل سنجی متداول است که به منظور حل مشکلات عدم همبستگی زمانی و مکانی همچنین اثرات اتمسفر طراحی شده است.

به دلیل محدودیتهای روش تداخل سنجی متداول فرتی و همکارانش تکنیک باز پراکنش کنندههای پایدار را ارائه کردند[۲۳]. پراکنش کنندههای پایدار عوارضی هستند که ویژگیهای پراکنشی آنها در طول زمان ثابت است و دچار عدم همبستگی زمانی و مکانی نمیشوند. این عوارض که عمدتاً سازههای دست بشر هستند، دچار

¹ Persistent Scattere

عدم همبستگی زمانی نمیشوند. پیکسلهایی وجود دارند که در آنها یک در مقدار موج باز پراکنش شده در آن پیکسل غالب است و مانند یک نقطهای دائم رفتار میکند؛ بنابراین مقدار عدم همبستگی بهطور قابلتوجهی کاهش مییابد.

شکل ۲–۱۱ پراکنش کنندههایی را که در مقدار فاز برگشتی از پیکسل شرکت دارند، نشان میدهد. شکل ۲– ۱۱-الف فاز موج راداری را اگر در طول زمان باز پراکنش کنندههای درون یک پیکسل بهطور تصادفی بهاندازه قابل مقایسه با طول موج رادار حرکت کنند، نشان میدهد. در شکل ۲–۱۱–ب بیشترین سهم فاز، مربوط به موجک بازتابش شده از پراکنش کننده پایدار است که سه برابر از مجموع سایر پراکنش کنندههای موجود در پیکسل روشن تر است. حتی اگر سایر پراکنش کنندههای موجود در پیکسل نسبت به هم حرکت کنند، سیگنال دریافتی از این پیکسل تغییرات بسیار کمی خواهد داشت و میتوان از طریق فاز موج برگشتی از پیکسل هرگونه حرکت آن پراکنش کننده را اندازه گیری نمود. نمودار ترسیم شده در زیر این شکلها، فاز دریافتی از پیکسل را در ۱۰۰ بار تکرار نشان میدهد. در هر تکرار پراکنش کنندههای درون پیکسل بهطور تصادفی نسبت به هم حرکت کردهاند[۳۲].

شکل ۱۱-۰ پراکنش کننده¬هایی که در مقدار فاز برگشتی از پیکسل شرکت دارند، الف: پیکسل بدون پراکنش کننده پایدار، ب: پیکسل دارای پراکنش کننده پایدار [۲۴].

بنابر⊣ین به کمک این تکنیک میتوان با استفاده از تمامی تصاویر موجود راداری در منطقه و بدون توجه به عدم همبستگی زمانی و مکانی آنها اقدام به تشکیل اینترفراگرامهایی نمود که فاز آنها تنها در نقاط باز پراکنش کننده پایدار قابلاستفاده است. همچنین از دیگر مزایای استفاده از این تکنیک آن است که میتوان تأخیر مربوط به اثر اتمسفر را با اعمال فیلتر بر روی سری زمانی حاصله برای هر پراکنش کننده پایدار برآورد نمود و از فاز آن کسر نمود، چرا که مقدار نویز مربوط به تغییر ویژگیهای پراکنشی در این نقاط ناچیز است.

تا-کنون روشهای متفاوتی در استفاده از پراکنش کنندههای پایدار ارائهشده است. اولین بار فرتی و همکارانش درروشی که پراکنش کنندههای پایدار نامیده شد، پیکسلهایی را بهعنوان پراکنش کننده پایدار انتخاب نمودند که تاریخچه رفتار فازی آنها منطبق بر یک مدل فرضی از چگونگی تغییر جابجایی در زمان باشد. ازنقطهنظر فیزیکی، این پراکنش کننده نقطهای می-تواند یک ساختمان، یک تختهسنگ بزرگ و مجزا و یا سطح یک سنگ در جریان سرد شدن مواد مذاب باشد. این روش در تصاویر مناطقی که بهوفور دارای عوارض دستساز بشر بودند، بسیار موفق بوده است.

درروش پیشنهادی فرتی و همکارانش به دلیل استفاده از یک مدل تابعی ^۱برای رفتار سنجی جابجایی در زمان و تشخیص پراکنش کننده پایدار، دانش تقریبی اولیه از نحوه رفتار جابجایی در زمان موردنیاز است. در این روش معمولاً رفتار جابجایی بهصورت یک رژیم پایدار و یا یک مدل نوسانی در نظر گرفته می شود. لیکن در بسیاری از مطالعات رفتار جابجایی در زمان از مسائلی است که به دنبال آن هستیم و از پیش مشخص نیست و همچنین در بسیاری از موارد جابجایی در زمان دارای رفتار ثابتی نیست. به عنوان مثال الگوی جابجایی در گسلی که دارای لغزش ناگهانی است و یا جابجایی ناشی از حرکت پس لرزه یک گسل از جمله رفتارهایی هستند که از قبل مشخص نمی باشند.

در روش پردازش پراکنش کنندههای پایدار StaMPS که توسط دانشگاه استانفورد ارائهشده است، با استفاده از تحلیل فاز میتوانیم بسیاری از نقاط پراکنش کننده پایدار را که حتی در مناطق غیرشهری (عاری از بازتابندههای گوشهای) قرار دارند، مشخص نماییم[۲۴]. در این روش بهجای استفاده از یک مدل زمانی برای تغییر شکل از

'Functional model

همبستگی مکانی اندازه گیری فاز استفاده می کند، به همین دلیل در مناطقی که جابجایی دارای رفتار غیرثابت و نامشخص است می توان از این روش استفاده کرد. زمانی که پراکنش کنندههای پایدار مشخص شدند، این الگوریتم مراحل مختلفی را برای حذف اثرات اتمسفر، خطای توپو گرافی و خطای مداری به کار خواهد برد.

در این روش ابتدا تعدادی نقطه بهعنوان پراکنش کنندههای کاندیدا با استفاده از تحلیل اطلاعات دامنه تصاویر و با استفاده از شاخص پراکندگی دامنه انتخاب می شوند. سپس با استفاده از تحلیل فاز، پایداری فاز این نقاط بررسی می شود. فاز یک اینترفراگرام از بخشهای متفاوتی تشکیل شدهاند که عبار تند از: فاز مربوط به جابجایی، فاز مربوط به اثر اتمسفر، فاز مربوط به خطای مدار ماهواره، فاز مربوط به خطای زاویه دید و فاز مربوط به تغییر ویژگیهای باز پراکنش کنندگی یک پیکسل. هدف اصلی در تحلیل فاز آن است که بهمنظور بررسی پایداری فاز در یک پیکسل فازهای مختلف از فاز اینترفراگرام در آن پیکسل برآورد و حذف شود. برآورد و حذف بخشهای مختلف فاز در یک فرآیند تکراری صورت می گیرد. در هر تکرار معیاری به نام همبستگی زمانی که بیان کننده تغییرات فاز باقیمانده است، محاسبه می گردد. این معیار شاخصی برای تشخیص آنکه آیا این پیکسل پراکنش كننده پايدار است، مىباشد. سپس احتمال آنكه يك پيكسل پراكنش كننده پايدار است با استفاده از شاخص پراکنندگی دامنه و همبستگی زمانی محاسبهشده و پراکنش کنندههای پایدار نهایی انتخاب میشوند. سپس بخشی از خطای دید که در مکان ناهمبسته است برآورد شده و پس از بازیابی فاز حذف می شود. بازیابی فاز از دو مرحله اصلی تشکیل شده است: ابتدا دادهها در بعد زمان بازیابی می شوند. در این مرحله به منظور کاهش اثر اتمسفر از اختلاففاز دو پیکسل مجاور استفاده می شود؛ بنابراین به ازای هر دو پیکسل مجاور یک سری زمانی از فاز وجود دارد. بهمنظور کاهش اثر نویز سری زمانی موجود از یک فیلتر پایین گذر عبور نموده و فاز آن با استفاده از شرط نمونهبرداری نایکوئیست بازیابی میشود. شرط نمونهبرداری نایکوئیست بیان میدارد که اختلاففاز دو پیکسل مجاور در بعد زمان و مکان کمتر از نیم سیکل یعنی π میباشد. در مرحله بعد اختلاففاز بازیابی شده بین دو پیکسل مجاور برای ساخت یک تابع هزینه بهمنظور بازیابی فاز در بعد مکان استفاده میشود. سری زمانی اختلاففاز بازیابی شده در فرآیند بهینهسازی الگوریتم دوبعدی برای دستیابی به فاز نهایی بازیابی شده استفاده می گردد. پس از بازیابی فاز در مرحله آخر بخشهایی از فاز که در مقایسه با سیگنال جابجایی بهصورت نویز عمل میکنند از فاز بازیابی شده برآورد و حذف میشوند. بخشی از فاز که هم در مکان و هم در زمان همبسته میباشد، مربوط به خطای اتمسفری و مداری تصویر پایه است. این فاز با اعمال یک فیلتر پایین گذر حذف میشود. از طرفی قسمتی از فاز که در زمان ناهمبسته و در مکان همبسته است، مربوط به خطای اتمسفری و خطای مداری تصاویر پیرو و همچنین خطای زاویه دید میباشد. این بخش از فاز با اعمال یک فیلتر بالا گذر بر روی سری زمانی اختلاففاز دو پیکسل مجاور استخراج می گردد. پس از برآورد این دو نوع فاز، آنها از فاز بازیابی شده کسر شده و سیگنال جابجایی به دست می آید.

روش StaMPS قادر است پراکنش کنندههای پایدار با تغییر شکل متغیر در زمان را شناسایی کند و ازآنجاکه در انتخاب پراکنش کنندههای پایدار از تحلیل فاز استفاده میکند، میتواند در مناطقی که عاری از عوارض دستساز بشری است، مورداستفاده قرار گیرد. روشهایی که تنها بر اساس تحلیل دامنه کار میکنند، تنها قادر خواهند بود عوارضی مثل بازتابندههای گوشهای که برگشت قوی به سمت سنجنده دارند را مشخص میکنند و از یافتن باز پراکنش کنندههای پایدار که برگشت قوی به سمت سنجنده ندارند، اما در طول زمان ویژگیهای باز پراکنش کننده پایدار دارند، مانند یک قطعهسنگ، عاجزند.

برخلاف روش خط مبنای کوتاه^۱ که از اینترفراگرامهای بین تصاویر با خط مبنای مکانی و زمانی کوچک استفاده می کند، الگوریتم پراکنش کننده پایدار در سری زمانی همه اینترفروگرامها را نسبت به یک تصویر پایه تشکیل میدهد. در این روش اینترفراگرامهایی که تنها در نقاط خاصی همبسته هستند و خط مبنای زمانی مکانی بلند دارند، بدون توجه به عدم همبستگی زمانی تشکیل میشوند. بنابراین قادر به تشکیل اینترفروگرام از تمام جفت تصاویر نسبت به یک تصویر مرجع خواهیم بود (شکل ۲–۱۲).

پس از عدم همبستگی، محدودیت مهم دیگر روش تداخل سنجی راداری متداول تغییر تأخیر سیگنال به دلیل انتشار در اتمسفر میباشد که منجر به فاز اضافی در تصویر میشود. بخارآب بیشترین تأثیر را در اثر اتمسفر دارد. پس از تشکیل اینترفروگرامها نسبت به یک تصویر پایه و شناسایی پیکسل پراکنش کننده پایدار، سیگنال مربوط

٣٢

'Small baseline method

به تأخیر اتمسفری با فیلتر کردن فاز نهایی سری زمانی بهدستآمده برای هر پیکسل پراکنش کننده پایدار، تخمین زدهشده و حذف میشود.

شکل ۰-۱۲ نمایش خط مبناها برای الف: روش پراکنش کننده پایدار، ب− روش خط مبنا کوتاه. دایره¬ها نشاندهنده تصاویر و خطوط نمایش اینترفروگرام¬های تشکیلشده است [۲۵].

۲-۱۱ تحلیل سری زمانی با استفاده از تلفیق باز پراکنش کننده های پایدار و خط مبناهای کوتاه

در حقیقت دو تکنیک باز پراکنش کنندههای پایدار و خط مبنای کوتاه مکمل یکدیگر هستند. با تلفیق این دو تکنیک نمونهبرداری مکانی سیگنال موردنظر بیشینه میشود. با افزایش نمونهبرداری مکانی علاوه برافزایش قدرت تفکیک مکانی سیگنال تغییر شکل، عملیات بازیابی فاز که تخمین تعداد سیکلهای مبهم فاز است، با اطمینان بیشتری تخمین زده میشود. هوپر در سال ۲۰۰۸ درروش جدیدی دو تکنیک باز پراکنش کنندههای پایدار و خط مبنای کوتاه را تلفیق کرد. در این روش سیگنال جابجایی در نقاط بیشتری استخراج میشود و نسبت سیگنال به نویز نیز کاهش مییابد[۲۶].

بدین ترتیب در این فصل ضمن معرفی تکنیک تداخل سنجی راداری، به روشهای متداول و روش باز پراکنش کنندههای پایدار بهعنوان ابزاری برای اندازه گیری سطح زمین اشاره شد و به موارد کاربرد این روشها و مزایای هرکدام پرداخته شد.

فصل وم

استخراج میدانهای جابجایی از

تصاویر راداری

فصل سوم استخراج میدانهای جابجایی از تصاویر راداری

اندازه گیری جابجاییهای زمین یک هدف کلیدی در مدیریت بحران میباشد. امروزه تکنیک تداخل سنجی راداری بهعنوان یک تکنیک متداول برای مطالعات جابجایی سطح زمین استفاده شده است؛ اما به هر صورت این تکنیک محدودیتهایی مانند حساسیت بالا به عدم همبستگی فاز تصاویر، مساله بازیابی فاز که غالبا مشکل است و اندازه گیری جابجایی تنها در جهت خط دید ماهواره و از دست دادن فرینجها در مکانی که گرادیان جابجایی بیش از نصف یک فرینج در هر پیکسل باشد (مانند مناطق نزدیک گسل)، دارد.

۱–۳ اندازه گیری جابجایی سهبعدی سطح زمین با استفاده از دادههای تداخل سنجی راداری ایت. یکی از محدودیتهای تکنیک تداخل سنجی راداری اندازه گیری مقدار جابجایی در راستای خط دید ماهواره است. با در اختیار داشتن سه اینترفرا گرام در هندسههای تصویربرداری متفاوت میتوان به سه مولفه جابجایی سطح زمین رسید. غالبا تعیین مولفه شمالی جابجایی با استفاده از دادههای ماهوارههای با مدارهای قطبی با مشکل مواجه است، ولی یک ماهواره با زاویه میل ^۱حدود [°]120 قادر است هر سه مولفه میدان جابجایی را تعیین کند.

رایت و همکاران در ۲۰۰۴ سعی کردند تا میدان جابجایی ۳ بعدی ناشی از زلزله ۲۰۰۲ ننامنتین آلاسکا را با استفاده از چند اینترفراگرام در هندسههای متفاوت به دست آورند[۲۷]. این زلزله اولین زلزلهای بود که برای آن ۴ اینترفراگرام با هندسه تصویربرداری متفاوت وجود داشت. خطای مولفه شمالی بزرگتر از سیگنال بود، ولی آنها توانستند مولفه های شرقی و شمالی جابجایی را به دست آورند. آنها با سه وضعیت متفاوت تصویربرداری، تصاویر با مشاهده راست نگر در مدارهای بالاگذر^۲و پایین گذر^۳با دو زاویه برخورد متفاوت از ماهواره ENVISAT، تصاویر با مشاهده راست نگر و چپ نگر در دو آزیموت متفاوت از ماهواره EVINSAT و تصاویر با مشاهده راست نگر و

i ncl i nat i on' ascendi ng' descendi ng' چپ نگر در دو آزیموت متفاوت و دو زاویه برخورد مختلف کار کردند. دقت مولفه شمالی در روش اول قابل مقایسه با دقت حاصله از روش آزیموت آفست بود، اما به دلیل نزدیک بودن دو زاویه برخورد و طبیعت مدارهای نزدیک به قطبی ماهواره ENVISAT دقت قابل قبول نبود، اما در دو روش دیگر وی توانست دقت مولفه شمالی را بهبود دهد.

اگر \hat{p} بردار سطری واحد (p_x, p_y, p_z) باشد که مولفه های بردار مشاهده از زمین به ماهواره را در یک سیستم مرجع محلی شرقی، شمالی، قائم نشان میدهد، تغییر برد مشاهده شده r با علامت مثبت وقتی که جابجایی در راستای خط دید ماهواره در جهت دور شدن از ماهواره است با رابطه (۱–۳) به دست میآید: $[u_n \sin \theta - u_e \cos \theta] \sin i + u_u \cos i + \delta_r = r$

i که در این رابطه θ آزیموت مدار ماهواره (از شمال در جهت عقربه ساعت، مثبت در نظر گرفته می شود) و i زاویه برخورد ماهواره در سطح زمین و δ_r خطای مشاهده (مثلاً در اثر عدم دسترسی به اطلاعات مداری دقیق، تأخیر اتمسفری، نا وابستگی فاز تصاویر و مدل رقومی زمین نادرست) است؛ بنابراین داریم: $r = -\hat{p}u + \delta_r$

که در این معادله u بردار ستونی $(u_x, u_y, u_z)^T$ است که شامل مولفه های جابجایی در همان سیستم مختصات مرجع محلی میباشد.

در حالتی که ۲ تصویر مربوط به مسیر بالاگذر و ۲ تصویر مربوط به مسیر پایین گذر در اختیار داریم، برای هر پیکسل روی زمین دو مشاهده جابجایی وجود دارد (شکل۳–۱)، دو بردار جابجایی در راستای خط دید ماهواره مربوط به اینترفراگرامهای بالاگذر و پایین گذر. این مشاهدات را با ماتریس R نشان میدهیم که مربوط به اینترفراگرامهای بالاگذر و پایین گذر. این مشاهدات را با ماتریس R نشان میدهیم که $R = -Ru + \Delta$

اگر \sum_{R}^{-1} ماتریس کوواریانس خطای تغییرات برد مشاهدهشده باشد، داریم:

$$\hat{u} = -\left[P^{T} \sum_{R}^{-1} P\right]^{-1} P^{T} \sum_{R}^{-1} R$$
(۴-۳)
$$e \text{ old and } e \text{ old and }$$

۳л

فصل چها ارم زمانی عت سرى محاسبات 9 میانگین

فصل چهارم محاسبات سری زمانی و سرعت میانگین

۴–۱ آنالیز سری زمانی به روش کمترین مربعات

تکنیک تداخل سنجی راداری یک ابزار جدید برای مشاهده تغییرات کوچک جابجایی در یک محدوده گسترده میباشد و میتواند برای پایش میدان جابجایی پوسته زمین استفاده شود. مخاطرات جابجایی سطح زمین از قبیل فرونشست، بالاآمدگی، رانش و یا زلزله میتواند بهوسیله این تکنیک موردبررسی قرار گیرد. این تکنیک بهطور موفقیتآمیزی برای به دست آوردن جابجایی در مناطق مختلف جهان استفادهشده است.

هر اینترفروگرام بهطور مجزا فقط حاوی تغییرات سطح در یک بازه زمانی است. با به کار بردن تعدادی اینترفروگرام به همراه آنالیز سری زمانی میتوان تغییرات سطح را طی زمان موردبررسی قرارداد. آنالیز سری زمانی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری روشی مناسب جهت برآورد نرخ تغییرات سطح زمین در قدرت تفکیک مکانی بالا میباشد. با در دست داشتن تعداد قابل توجهی اینترفروگرام، میتوان با استفاده از سرشکنی کمترین مربعات مقدار جابجایی سطح زمین را برای هر نقطه و در هر تاریخ محاسبه نمود. بدین ترتیب مشاهدات که اینترفراگرامها هستند، به سری زمانی جابجایی تبدیل میشوند. دراین روش با استفاده از افزونگی اطلاعات تأثیرات خطاهای پردازشی و نویز عدم همبستگی کاهش مییابد و نتایج میتواند بهمنظور مدلسازی و مطالعات زمینشناسی مورداستفاده قرار گیرد.

فرض کنید بردار X بردار جابجایی در زمانهای اخذ داده راداری است ([... $x_2 x_3 \dots x_2 x_3 \dots x_1] = l$ بردار مقادیر تغییرات سطح زمین در یک حل مساله کمترین مربعات برآورد شود و [... 113, 123, 113] = l بردار مقادیر تغییرات سطح زمین در یک بازه زمانی است که از اینترفروگرام ها استخراج میشود و بهعنوان بردار مشاهدات درحل مساله کمترین مربعات مورداستفاده قرار میگیرد. به فرض اگر سه نقشه جابجایی 113, 123, 113 را داشته باشیم ترکیب خطی 113+ از مقادیر جابجایی مطلق برای هر پیکسل باید صفر باشد؛ بنابراین: $d_{l_{12}}(mn) + d_{l_{23}}(mn) + d_{l_{13}}(mn) = 0$ ((-1)

از نقشه های جابجایی (با فرض اتفاقی بودن نویز) ترکیب خطی بالا صفر نخواهد شد. اگر یکی از نقشه ها دارای
بایاس باشد خواهیم داشت:

$$d'_{l_{12}}(mn) = d_{l_{12}}(mn) + k$$
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 (-7)
 $($

که در آن d میزان جابجایی مطلق وm,n سطر و ستون نقشه جابجایی می باشند. به دلیل وجود نویز در هر یک

 ${
m M}$ بنابراین مشاهدات سرشکنی کمترین مربعات، شامل ${
m N}$ نقشه جابجایی اینترفروگرام است که از تفاضل فاز ${
m M}$ تصویر ماهوارهای راداری (پس از حذف عوامل توپوگرافی و اتمسفر) در تاریخهای مختلف به دست آمده است. بردار مجهولات، بردار سری زمانی جابجایی در تاریخ اخذ تصاویر می باشد. اگر تاریخ t_1 به عنوان مبدأ زمانی در نظر بگیریم، مدلی که بین مشاهدات و مجهولات ارتباط بر قرارمی کند تابعی از سرعت تغییر شکل در زمان های مختلف است.

$$l_{ij} = v_0(t_1 - t_0) + v_1(t_2 - t_1) + \dots + v_{n-1}(t_n - t_{n-1})$$
(4- Δ)

به عنوان مثال اگر از تاریخ i تا j اینترفروگرامی وجود داشته باشد، این رابطه شامل تمام اینترفروگرام های ممکن در بازه زمانی i و t_{10} او t_{10} و t_{10} او t_{10} و t_{10} و الست. به طور مثال اگر ۵ تاریخ جمع آوری داده توالی t_4 و t_4 و t_2 و t_1 موجواین که و با فرض این که اینترفروگرام ها برای فواصل $(t_2t_4)_e(t_2t_3)_e(t_1t_4)_e(t_1t_2)_e(t_0t_4)_e(t_0t_2)_e(t_0t_4)$ در دسترس باشد و میزان جابجایی برای این فواصل₂₄او₂₃ و1₁4 و1₁2 و₀4 و₀1 و₀2 و₁0 و₁0 باشد، مسئله سرشکنی کمترین مربعات بهصورت زیر فرموله میشود:

(۴-۶)

$$\begin{cases} l_{01} = v_0(t_1 - t_0) \\ l_{02} = v_0(t_1 - t_0) + v_1(t_2 - t_1) \\ l_{04} = v_0(t_1 - t_0) + v_1(t_2 - t_1) + v_2(t_3 - t_2) + v_3(t_4 - t_3) \\ l_{12} = v_1(t_2 - t_1) \\ l_{14} = v_1(t_2 - t_1) + v_2(t_3 - t_2) + v_3(t_4 - t_3) \\ l_{23} = v_2(t_3 - t_2) \\ l_{23} = v_2(t_3 - t_2) + v_3(t_4 - t_3) \end{cases}$$

که در روابط بالا*i*=0,1,2,3) میزان نرخ جابجایی مجهول برای هر یک از بازههایی بالامیباشد. سیستم معادلات متناظر بالا به فرم ماتریسی به شکل زیرمیباشد.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} l_{01} \\ l_{02} \\ l_{04} \\ l_{12} \\ l_{14} \\ l_{23} \\ l_{23} \\ L \end{bmatrix}}_{L} = \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} (t_1 - t_0) & 0 & 0 & 0 \\ (t_1 - t_0) & (t_2 - t_1) & 0 & 0 \\ (t_1 - t_0) & (t_2 - t_1) & (t_3 - t_2) & (t_4 - t_3) \\ 0 & (t_2 - t_1) & 0 & 0 \\ 0 & (t_3 - t_2) & 0 \\ 0 & 0 & (t_3 - t_2) & (t_4 - t_3) \\ \hline A \end{bmatrix}}_{\tilde{X}} \underbrace{\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ V \\ X \end{bmatrix}}_{\tilde{X}}$$

A همانطور که گفتیم رابطه بردار مشاهدات و بردار مجهولات برابر با X = L است و همانطور که ذکر شد A ماتریس ضرایب است. حل مساله کمترین مربعات جهت تعیین بردار جابجایی به صورت رابطه زیر می باشد: (۴-۸) $X = (A^T P A)^{-1} A^T P L$

که در این رابطه P ماتریس وزن مشاهدات میباشد وXمیزان جابجایی برآورد شده برای بازههای مختلف میباشد. دقت مجهولات طبق تئوری کمترین مربعات طبق فرمول زیر برآورد میشود:

$$C_X = (A^T P A)^{-1} \tag{(f-9)}$$

وزن مشاهدات برای پیکسلها تابعی از میزان همدوسی اینترفروگرام ها، تأثیرات اتمسفری، خطاهای مداری، نویز و... میباشد. تصویر همدوسی تعیینکننده میزان کیفیت اینتروفروگرام ها و بهعنوان تابعی از عوامل مختلف که بر میزان همدوسی تأثیر میگذارد، میباشد. بنابراین عناصر غیر قطری ماتریس وزن میزان همدوسی اینتروفرگرام مربوطه میباشد. واریانس فاز اینترفروگرام مطابق رابطه زیر حساب میگردد:

$$VAR(\varphi) = \frac{1-\gamma^2}{2\gamma^2} \qquad (f-11)$$

که در آن γ میزان همدوسی پیکسل های فاز اینترفروگرام است. همچنین RMS اینترفراگرامها در مناطق بدون را جابجایی میتواند بهعنوان معیاری برای برآورد دقت مشاهدات در نظر گرفتهاند و عناصر قطری ماتریس وزن را تشکیل دهد.؛ بنابراین وجود شبکه ترازیابی و یا ایستگاههای دائم GPS میتواندحائز اهمیت باشد و میتوان با استفاده از نقاط دور از منطقه جابجایی و استفاده از ددادههای ژئودتیکی RMS هریک از اینترفروگرام ها بدست آورد و بهعنوان دقت مشاهدات در ماتریس وزن قرارداد.

۴-۲ مطلق سازی و صحت سنجی سری زمانی و نقشه سرعت

ازآنجایی که در سری زمانی جابجایی بهدست آمده از روش تداخل سنجی راداری، مشاهدات، اختلاف فازهای تصاویر در زمانهای اخذ تصاویر هستند و هیچ اطلاعاتی در مورد جابجایی مطلق موجود نمی باشد، لذا به منظور ارائه نقشه های جابجایی و سرعت مطلق، می بایست از سایر منابع مشاهدات ژئودتیک مانند تغییر ارتفاعی ایستگاههای ترازیابی و یا مشاهدات GPS به منظور معرفی منطقه صفر جابجایی استفاده نمود. بدین منظور ضروری است مناطقی که از طرفی در زمینهای پست و هموار و بدون تغییرات ارتفاعی واقع شده اند (که خطای باقیمانده اثر توپوگرافی در آنها وجود ندارد) و از طرف دیگر، مشاهدات ترازیابی و GPS در آنها نشان دهنده جابجایی صفر می باشد، به عنوان منطقه با جابجایی صفر اعمال شود. همچنین در صورت وجود ایستگاههای ترازیابی و مشاهدات ایستگاههای دایمپایدار GPS در مناطق فرونشست، مقایسه جابجایی و سرعت به دست آمده از تکنیک تداخل سنجی راداری با مشاهدات این ایستگاهها می تواند به منظور ارزیابی صحت نتایج استفاده شود.

۳-۴ تفسیر نتایج فرونشست به جهت آشکارسازی علت ایجاد

همانطور که در مقدمه ذکر شد، فرونشست سطح زمین، کاهش تدریجی ارتفاعی سطح زمین در اثر دخالتهای انسانی مانند استخراج بیرویه آب زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، فعالیتهای معدنی و یا در اثر پدیدههای تکتونیکی میباشد. همچنین از دیگر عوامل کاهش ارتفاعی در مناطق بیابانی فرسایش خاکی میباشد. لذا ضروری میباشد با استفاده از تصاویر اپتیکی، اطلاعات نقشههای پوششی کشور و بررسی وضعیت آب زیرزمینی نسبت به علتیابی کاهش ارتفاع منطقه مور مطالعه اقدام گردد.

فصل پن 3

گزارش نهائی و ارائه نتایج

فصل پنجم: گزارش نهایی و ارائه نتایج

ارائه نتایج باید دارای ویژگیهای ذکرشده در این فصل باشد.

۵–۱ گزارش تصاویر راداری استفاده شده در پردازش

این گزارش میبایست موارد ذیل به صورت کامل ارائه شود:

- اسم ماهواره و سنجنده استفادهشده
- شماره و نوع مدار استفاده شده (بالاگذر یا پایین گذر)
 - تعداد تصاویر استفاده شده

تعداد تصاویر میبایست حداقل یک تصویر در هرماه و در دوره زمانی حداقل ۲ سال باشد.

- تاریخ تصویر پایه استفاده شده
- خط مبنای مکانی و زمانی تصاویر

جدول مقادیر خط مبنای مکانی و زمانی ترجیحاً به همراه نمودار ترسیمی و میزان حداکثر مقدار خط مبنای انتخاب شده می بایست در گزارش ذکر شود.

• مدل رقومی استفاده شده بهمنظور حذف اثر توپوگرافی

این اطلاعات میبایست شامل نام مدل رقومی، قدرت تفکیک مکانی و دقت آن باشد.

مدل اتمسفر استفاده شده

درصورت استفاده از مدل اتمسفر اطلاعات استفاده شده در این زمینه ذکر شود.

۲–۵ گزارش پردازش تصاویر

اطلاعات پردازش تصاویر میبایست شامل موارد ذیل باشد:

نام نرمافزار استفاده شده در پردازش تصاویر

دقت ثبت هندسی تصاویر در نرمافزار

این دقت می بایست حداقل ۰٬۰۰۱ پیکسل باشد [۲۸].

• روش پردازش تصاویر راداری

روش پردازش شامل موارد ذیل میباشد:

تداخل سنجي با خط مبناي كوتاه

تداخل سنجی با روش پراکنش کنندههای پایدار

مدل رقومی استفاده شده تبدیل شده در هندسه مداری
 از آنجایی که در فرآیند حذف اثر توپو گرافی از اینترفرا گرامها، مدل رقومی استفاده شده با استفاده از هندسه

مداری ماهواره به هندسه تصاویر راداری برده میشود، ارائه فایل مدل رقومی استفاده شده در هندسه مداری بهمنظور ارزیابی صحت حذف اثر توپوگرافی از نتایج الزامی است.

- فیلتر اعمال شده بر اینترفراگرامها به منظور بهبود کیفیت و مشخصات آن
 - ضریب multi-look اعمال شده بر تصاویر و پیکسل سایز نهایی نتایج
- میزان حداقل همبستگی به منظور انجام عملیات ابهام فاز و عملیات زمین مرجع کردن نتایج

حداقل همبستگی بهمنظور تدقیق عمیات رفع ابهام فاز میبایست ۰٫۳ لحاظ شود.

نام نرمافزار استفاده شده به منظور انجام عملیات ابهام فاز

۳-۵ گزارش نتایج

موارد الزامی در این قسمت به شرح ذیل میباشد:

• نرم افزار مورداستفاده

نرمافزار استفادهشده برای تمام مراحل کار از پردازش اینترفرو گرامهای تفاضلی تا آنالیز سری زمانی میبایست ذکر شود.

- تاریخ تصاویر استفادهشده
- جدول خط مبنای مکانی و زمانی تصاویر
 - گزارش مطلقسازی نتایج

گزارش مربوط به منطقه انتخاب شده به عنوان منطقه فاقد جابجایی که با استفاده از سایر مشاهدات ژئودتیک مانند ترازیابی دقیق و GPS انتخاب می شود، در این قسمت ارائه می شود. مشاهدات GPS منطقه (ترجیحاً هم زمان با تصاویر راداری استفاده شده)، نتایج تغییرات ارتفاعی با استفاده از مشاهدات ترازیابی دقیق به تفصیل در این قسمت گزارش می شود.

صحت سنجی نتایج

مقایسه میدان جابجایی بهدست آمده از تداخل سنجی راداری با سایر اطلاعات ژئودتیک

- سرعت میانگین محاسبه شده در بازه زمانی مدنظر در جهت خط دید ماهواره
 - میدان سرعت جابجایی محاسبه شده در جهات XوZ
 - سری زمانی جابجایی
 - ماتریس دقت نتایج
 - تفسیر نتایج فرونشست به جهت آشکارسازی علت ایجاد

از آنجاکه علت تغییر ارتفاع سطح زمین میتواند ناشی از استخراج بیرویه آب زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، فعالیتهای معدنی، فرسایش خاکی، فعالیتهای تکتونیکی و ... باشد، ضروری است با استفاده از تصاویر اپتیکی، اطلاعات نقشههای پوششی کشور و بررسی وضعیت آب زیرزمینی و سایر اطلاعات، علت تغییر ارتفاع منطقه موردبررسی قرارگیرد و نتایج واکاوی علت تغییرات به صورت مستند ارائه گردد.

مراجع و منابع

1 Rodgers, A.E.E., and P.R. Ingalls, 1996. Venus: Mapping the surface Reflectivity by Radar Interferometry, science, No. 165, pp 769-799.

2 Zisk, S.H. 1972b., Lunar Topography: First Radar-interferometer Measurment of Alphonsus-Arzachel Region, Science, No. 178, pp,977-980

3 Graham. L.C., 1974. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping, Proceedings of the IEEE, Vol. 62. pp. 763-768.

4 Zebker, H. and R. Goldstein, 1986. Topographic Mapping from Interferometric SAR Observations, Journal of geophysical Research, Vol .91, B5, pp. 4993-4999.

5 Gabriel, A.K., R.M. Goldstein, and H.A. Zebker, 1989. Mapping Small Elevation Changes Over Large Area: Differential Radar Interferometry, Journal of geophysical Research, Vol .94, B7, pp. 9183-9191.

6 Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Fiegl, K. & Rabaute. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, 364, 138–142.

7 Zebker, H. and R. Goldstein, 1986. Topographic Mapping from Interferometric SAR Observations, Journal of geophysical Research, Vol .91, B5, pp. 4993-4999.

8 Amelung, F., D. Galloway, J.W. Bell, H.A. Zebker, and R.J. Laczniak, (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer system deformation. Geology, volume 27, pages 483–486.

9 Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry", IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing, 39 (1), 8 – 20, 2001.

10 Tortosa, D., Remote Sensing Course, WWW site http://hosting.soonet.ca/eliris/remotesensing/bl130lec13.html, 2002, (accessed 08.10.2013).

11 Massonnet, D., Feigl, K., RADAR INTERFEROMETRY AND ITS APPLICATION TO CHANGES IN THE EARTHS SURFACE, Reviews of Geophysics, pages 441-500, 36, 4 /November 1998.

12 Liu, H.; Zhou, B.; Bai, Z.; Zhao, W.; Zhu, M.; Zheng, K.; Yang, S.; Li, G. Applicability Assessment of Multi-Source DEM-Assisted InSAR Deformation Monitoring Considering Two Topographical Features. Land 2023, 12, 1284. <u>https://doi.org/10.3390/land12071284</u>

13 George Joseph and C Jeganathan, Fundamentals of Remote Sensing, Universities Press, 2003.

14 F.M. Henderson, A.J. Lewis, Principles & application of Imaging Radar, (1998), "Manual of Remote Sensing: Principles and Applications of Imaging Radar", 3rd Edition

15 Zebker, H.A., P.A. Rossen, R.M. Goldstein, C. Werner, and A. Gabriel. 1994b. On the Derivation of Coseismic Displacement Field Using Diffrential Radar Interferometry, Journal of Geophisical Research- Solid Earth, Vol. 99. No. 10. pp. 19617-19634.

16 Ulaby, Fawwaz & Long, David & Blackwell, William & Elachi, Charles & Fung, Adrian & Ruf, Christopher & Sarabandi, K. & Zyl, Jakob & Zebker, Howard. (2014). Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing.

17 Macchiarulo, Valentina & Milillo, Pietro & Blenkinsopp, Chris & Reale, Cormac & Giardina, Giorgia. (2021). Multi-Temporal InSAR for transport infrastructure monitoring: Recent trends and challenges.

18 Masoome Amighpey, Behzad vosoghi, Mahdi Motagh, Deformation and fault parameters of the 2005 Qeshm earthquake in Iran revisited: A Bayesian simulated annealing approach applied to the inversion of space geodetic data. Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.(2013), http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.06.006

19 گزارش جامع فرونشست در ایران، آمیغ پی و همکاران، ۱۴۰۲، سازمان نقشهبرداری کشور

20 Yarmohammad Touski, M., Dehghani, M. & Veiskarami, M. Monitoring and modeling of a landslide in Kahroud, Iran, by InSAR measurements and slope stability analysis. Nat Hazards 117, 2249–2268 (2023). https://doi.org/10.1007/s11069-023-05941-y

21 Watson, A. R., Elliott, J. R., & Walters, R. J. (2022). Interseismic strain accumulation across the Main Recent Fault, SW Iran, from Sentinel-1 InSAR observations. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127, e2021JB022674.

22 Mahdi Motagh, Roghayeh Shamshiri, Mahmud Haghshenas Haghighi, Hans-Ulrich Wetzel, Bahman Akbari, Hossein Nahavandchi, Sigrid Roessner, Siavash Arabi, Quantifying groundwater exploitation induced subsidence in the Rafsanjan plain, southeastern Iran, using InSAR time-series and in situ measurements, Engineering Geology, Volume 218, 2017, Pages 134-151,

23 Liu, F., Elliott, J. R., Craig, T. J., Hooper, A., & Wright, T. J. (2021). Improving the resolving power of InSAR for earthquakes using time series: A case study in Iran. Geophysical Research Letters, 48, e2021GL093043.

- 24 Hooper, A., "Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation", PH.D. thesis, Standford Universit, 2006.
- 25 Hooper, A. & Bekaert, D., "Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation", Tectonophysics, The International Journal of Integrated Solid Earth Ssiences, v.514-517, p.1-13, 2012.
- 26 Hooper, A., A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches, Geophys. Res. Letters, 35, L16302, doi:10.1029/2008GL034654, 2008.
- 27 Wright, T. J., B. E. Parsons, and Z. Lu (2004b), Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR, Geophys. Res. Lett., 31,L01607, doi:10.1029/2003GL018827.

28 Fattahi, Heresh & Agram, Piyush & Simons, Mark. (2016). A Network-Based Enhanced Spectral Diversity Approach for TOPS Time-Series Analysis. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. PP. 1-10. 10.1109/TGRS.2016.2614925.

Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization National Cartographic Center

Title

Subsidence map production applying SAR images

No: Last Edition: 18-09-2021

National Cartographic Center www.ncc.gov.ir

Standard Department

http://standard.ncc.gov.ir