



سازمان نقشه‌برداری کشور

جمهوری اسلامی ایران
سازمان برنامه‌بودجه کشور
سازمان نقشه‌برداری کشور

تهیه نقشه‌های فرونشست توسط تصاویر ماهواره‌ای راداری

استاندارد/دستورالعمل

آخرین ویرایش : ۱۰-۰۱-۱۴۰۴

<http://www.ncc.gov.ir>

سازمان نقشه‌برداری کشور

گروه استانداردسازی

اداره کل نظارت، کنترل فنی و

استاندارد

فروردین ۱۴۰۴

پیشگفتار

گسترش بهره‌برداری بی‌رویه از آب به ویژه در امور کشاورزی و صنعت، جامعه امروز را با اثرات نامطلوب زیادی در جنبه‌های کمی و کیفی منابع آب مواجه کرده است. افزایش روزافزون بهره‌برداری از منابع آب‌های زیرزمینی به ویژه در حوضه‌هایی که با نهشته‌های آبرفتی انباشته گشته‌اند، در مناطق مختلفی از کشور عزیزمان ایران، موجب فرونشست زمین شده است. مخاطرات پدیده فرونشست ابعاد گسترده‌ای دارد که از آن جمله می‌توان به تغییر ناهمسان در ارتفاع و شیب رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و سازه‌های انتقال آب، شکست و یا بیرون زدگی لوله جدار چاه‌ها در نتیجه تنش‌های تراکمی ناشی از تراکم آبخوان‌ها و ایجاد اختلال در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، پیشروی امواج در مناطق پست ساحلی، کاهش برگشت‌ناپذیر تمام یا بخشی از مخزن آب زیرزمینی در نتیجه از بین رفتن یا کاهش تخلخل مفید نهشته‌ها، کاهش میزان نفوذ پذیری سطحی و پیرو آن گسترش پهنه‌های بیابانی و سیلابی و کاهش بازدهی یا ایجاد تخریب در شریان‌های حیاتی و سازه‌های مهم اشاره کرد. بنابراین با توجه به گستردگی دامنه مخاطرات فرونشست، مدیریت این پدیده امری حیاتی در مدیریت شهری محسوب می‌شود.

شالوده هر طرح ملی برای رویارویی با این مخاطره، بر سه اصل تشخیص محدوده‌های درگیر، چاره‌یابی و ارائه راهکارهای مقابله و پایش مستمر وضعیت فرونشست استوار است که در گام نخست شناسایی محدوده‌های درگیر فرونشست و نرخ آن اطلاعات ارزشمندی در جهت شناسایی مناطق بحرانی به منظور مدیریت و کنترل پدیده فرونشست و مدیریت بهینه آبهای زیر زمینی در اختیار قرار میدهد.

سازمان نقشه برداری کشور به عنوان متولی پایش تغییرات هندسی پوسته زمین در کشور، در راستای تحقق اهداف برنامه ملی کاهش خطر حوادث و سوانح - مصوب ۱۴۰۰ / ۰۹ / ۲۴ شورای عالی مدیریت بحران کشور، نقشه جامع نرخ و پهنه‌های فرونشست زمین در کشور را تهیه نموده است. همچنین به جهت اهمیت موضوع پس از سال‌ها فعالیت در حوزه پایش تغییرات پوسته زمین در ایران و ارائه گزارشات منظم و دوره‌ای به متولیان ذی‌ربط و مسئولین مدیریت بحران کشور و با توجه به فقدان دستورالعمل و استاندارد مصوب برای تهیه نقشه‌های فرونشست، اقدام به تهیه و تدوین استاندارد و دستورالعمل "تهیه نقشه‌های فرونشست توسط تصاویر ماهواره‌ای

رأدارى " نموده است. امید است مجموعه این فعالیتها، گام مهمى در مدیریت و کنترل پدیده فرونشست، حفظ محیط زیست و توسعه پایدار کشور و آمایش سرزمین برداشته شود.

معصومه آمیغ پی

(مسئول گروه تدوین دستورالعمل)

فروردین ۱۴۰۴

تهیه نقشه‌های فرونشست توسط تصاویر ماهواره‌ای راداری

اعضای گروه تهیه‌کننده:

نام و نام خانوادگی: معصومه آمیغ پی	سازمان نقشه‌برداری	دکتری عمران نقشه‌برداری- ژئودزی
نام و نام خانوادگی: سیاوش عربی	سازمان نقشه‌برداری	کارشناسی ارشد، عمران نقشه‌برداری- سنجش از دور

اعضای گروه نظارت :

نام و نام خانوادگی	محل کار	مدرک تحصیلی
مریم دهقانی	دانشگاه شیراز	دکتری عمران نقشه‌برداری- سنجش از دور
مهرنوش امتی	سازمان نقشه‌برداری	دکتری نقشه‌برداری- سنجش از دور

اعضای گروه هدایت و راهبری:

نام و نام خانوادگی	محل کار	مدرک تحصیلی
علی صفایی	سازمان نقشه‌برداری	کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی و سنجش از دور
مریم صارمی	سازمان نقشه‌برداری	کارشناسی ارشد سیستم‌های اطلاعات مکانی و سنجش از دور



جناب آقای مرتضی صدیقی
معاون محترم فنی و تولید اطلاعات مکانی
جناب آقای حمیدرضا سیدین بروجنی
معاون محترم فناوری و ارائه اطلاعات مکانی
جناب آقای ابوطالبی
مدیر کل محترم نقشه برداری هوایی و فضایی
جناب آقای سید عبدالرضا سعادت
مدیر کل محترم نقشه برداری زمینی و بنیادی
جناب آقای علی سلطانپور
مدیر محترم آبنگاری و امور جزر و مدی
جناب آقای علی مدد
مدیر کل محترم سامانه های ملی و زیر ساخت های اطلاعات مکانی
جناب آقای مهدی سعیدی انجیله
مدیر محترم نقشه نگاری و اطلس های ملی
جناب آقای نعمت الله حبشی
مدیر محترم خدمات فنی
جناب آقای پیمان بکتاش
سرپرست محترم اداره کل نظارت ، کنترل فنی و استاندارد

موضوع : ابلاغ دستورالعمل "تهیه نقشه های فرونشست توسط تصاویر ماهواره ای راداری"

با سلام و احترام،

سازمان نقشه برداری کشور به عنوان متولی پایش تغییرات هندسی پوسته زمین در کشور، در راستای تحقق اهداف برنامه ملی کاهش خطر حوادث و سوانح - مصوب ۱۴۰۰/۰۹/۲۴ شورای عالی مدیریت بحران کشور، نقشه جامع نرخ و پهنه های فرونشست زمین در کشور را تهیه نموده است. همچنین به جهت اهمیت موضوع پس از سال ها فعالیت در حوزه پایش تغییرات پوسته زمین در ایران و ارائه گزارش های منظم و دوره ای به متولیان ذی ربط و مسئولین مدیریت بحران کشور و با توجه به فقدان دستورالعمل و استاندارد مصوب برای تهیه نقشه های فرونشست، اقدام به تهیه و تدوین استاندارد و دستورالعمل «تهیه نقشه های فرونشست توسط تصاویر ماهواره ای راداری» نموده



شماره: ۱۴۰۴ - ۴۷۳۸

تاریخ: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

پیوست: دارد



باسمه تعالی



ریاست جمهوری
سازمان برنامه و بودجه کشور

رئیس



است. امید است مجموعه این فعالیت‌ها، گام مهمی در مدیریت و کنترل پدیده فرونشست، حفظ محیط‌زیست و توسعه پایدار کشور و آمایش سرزمین برداشته شود. در همین راستا دستورالعمل مذکور جهت بهره‌برداری ابلاغ می‌گردد.


سیداسکندر صیدایی



فهرست

فصل اول	۱
فصل اول: مقدمه	۳
فصل دوم تداخل سنجی راداری	۷
۱-۲ تاریخچه تداخل سنجی راداری	۷
۲-۲ تصاویر راداری	۸
۳-۲ هندسه تصویربرداری راداری	۱۰
۴-۲ قدرت تفکیک مکانی تصاویر راداری	۱۱
۵-۲ رادار با دریچه مصنوعی	۱۳
۶-۲ دامنه و فاز در تصاویر راداری	۱۴
۷-۲ تداخل سنجی راداری	۱۵
۱-۷-۲ خط مبنای مکانی	۱۶
۲-۷-۲ خط مبنای زمانی	۱۸
۳-۷-۲ خط مبنای ترکیبی	۱۸
۴-۷-۲ همبستگی تصاویر	۱۸
۸-۲ تداخل سنجی راداری تفاضلی	۱۸
۱-۸-۲ نقشه تغییرات	۱۹
۲-۸-۲ تئوری و الگوریتم	۱۹
۳-۸-۲ سیستمهای تهیه نقشه تغییرات با تداخل سنجی	۲۳
۴-۸-۲ مراحل استخراج تغییرات ارتفاع از فاز تصویر (تهیه نقشه تغییر)	۲۳
۵-۸-۲ عوامل موثر بر دقت تغییرات ارتفاعی	۲۷
۶-۸-۲ کاربردهای تداخل سنجی راداری	۲۸
۹-۲ روش بازپراکنش کننده های پایدار	۲۸
۱۰-۲ تحلیل سری زمانی با استفاده از تلفیق بازپراکنش کننده های پایدار و خط مبنای کوتاه	۳۳
فصل سوم استخراج میدانهای جابجایی از تصاویر راداری	۳۶
۱-۳ اندازه گیری جابجایی سه بعدی سطح زمین با استفاده از داده های تداخل سنجی راداری	۳۶

فصل چهارم محاسبات سری زمانی و سرعت میانگین.....	۴۰
۴-۱ آنالیز سری زمانی به روش کمترین مربعات.....	۴۰
۴-۲ مطلق سازی و صحت سنجی سری زمانی و نقشه سرعت.....	۴۳
۴-۳ تفسیر نتایج فرونشست به جهت آشکارسازی علت ایجاد.....	۴۴
فصل پنجم: گزارش نهایی و ارائه نتایج.....	۴۶
۵-۱ گزارش تصاویر راداری استفاده شده در پردازش.....	۴۶
۵-۲ گزارش پردازش تصاویر.....	۴۷
۵-۳ گزارش نتایج.....	۴۸
فصل پنجم: مراجع و منابع.....	۴۶

فهرست اشکال و تصاویر

شکل ۱-۲ طیف امواج الکترومغناطیس که در رادار استفاده می شود.....	۹
شکل ۲-۲ هندسه تصویر راداری.....	۱۱
شکل ۳-۲ قدرت تفکیک مکانی آزیموتی.....	۱۲
شکل ۴-۲ قدرت تفکیک مکانی برد.....	۱۲
شکل ۵-۲ رادار با دریچه مصنوعی، سیگنالها طوری پردازش می شوند که گویا توسط آنتن با طول مصنوعی B دریافت شده اند.....	۱۳
شکل ۶-۲ تصویر مختلط راداری، الف) دامنه تصویر، ب) فاز تصویر.....	۱۴
شکل ۷-۲ اینترفروگرام به دست آمده از پردازش تصاویر راداری در منطقه زلزله بم.....	۱۶
شکل ۸-۲ هندسه تداخل سنجی.....	۱۷
شکل ۹-۲ مراحل استخراج تغییرات ارتفاع از فاز تصویر.....	۲۵
شکل ۱۰-۲ مراحل بازبازی فاز.....	۲۶
شکل ۱۱-۲ پراکنش کننده هایی که در مقدار فاز برگشتی از پیکسل شرکت دارند، الف: پیکسل بدون پراکنش کننده پایدار، ب: پیکسل دارای پراکنش کننده پایدار.....	۲۹
شکل ۱۲-۲ نمایش خط مبناها برای الف: روش پراکنش کننده ثابت، ب- روش خط مبنا کوتاه. دایره ها نشان دهنده تصاویر و خطوط نمایش اینترفروگرامهای تشکیل شده است.....	۳۳

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

نقشه نهایی

فصل اول

مقدمه

فصل اول: مقدمه

فرونشست سطح زمین، کاهش تدریجی ارتفاعی سطح زمین در اثر دخالت‌های انسانی مانند استخراج بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، فعالیت‌های معدنی و یا ناشی از پدیده‌های تکتونیکی می‌باشد. 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 بی‌برنامه از منابع آب زیرزمینی از یک‌سو و پیامدهای جهانی تغییر اقلیم از دیگر سو موجب فرونشست زمین در مناطق متعددی از کشور شده است. مخاطرات ناشی از فرونشست، شامل تخریب آبخوان، ایجاد تغییر هیدرولوژی منطقه و آسیب به سازه‌های سطحی و زیرسطحی و خطوط حمل و نقل و انتقال نیرو می‌باشد. شناسایی مناطق فرونشست و طبقه‌بندی آنها از لحاظ وسعت و نرخ جابجایی نخستین گام در جهت مدیریت این مخاطره می‌باشد.

ژئودزی، علم تعیین شکل، ابعاد و میدان ثقل زمین و بررسی تغییرات زمانی آن می‌باشد. بررسی تغییرات سطح زمین، می‌تواند به عنوان پیش‌نشانگر 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 اندازه‌گیری میدان جابجایی پوسته زمین توسط مشاهدات ژئودتیکی همچون ترازیابی دقیق، GPS و تداخل سنجی انجام شده است.

ترازیابی دقیق به عنوان قدیمی‌ترین تکنیک اندازه‌گیری ارتفاع و اختلاف ارتفاع، جابجایی ارتفاعی سطحی زمین را با دقت بالا اندازه‌گیری می‌کند؛ اما با محدودیتهایی مانند قدرت تفکیک مکانی و زمانی پایین و هزینه بالا و زمان‌بر 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 فراهم شده است. تکنیک تداخل سنجی راداری، در چند دهه اخیر تکنیک متداولی برای اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین گردیده است. پوشش سراسری و قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر راداری و دقت قابل قبول این روش، این تکنیک را به عنوان

ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده های مختلف زمین شناسی همچون زلزله، فرونشست، 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 محدودیت های تکنیک تداخل سنجی راداری، امکان اندازه گیری جابجایی در راستای خط دید ماهواره می باشد. به منظور حل این مشکل، تلاش هایی در جهت استخراج میدان جابجایی سه بعدی از تصاویر راداری صورت پذیرفته است.

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

نسخه نهایی

فصل دوم

تداخل سنجی راداری

فصل دوم تداخل سنجی راداری

امروزه تکنیک تداخل سنجی راداری^۱ به عنوان 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 به عنوان ابزار نیرومندی برای مطالعه پدیده های مختلف زمین شناسی همچون زلزله، فرونشست، زمین لغزش و ... مطرح کرده است. تکنیک تداخل سنجی راداری جابجایی سطح زمین را با قدرت 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 sentinel-1 امکان برآورد جابجایی در بازه زمانی ۱۲ روز فراهم شده است.

۲-۱ تاریخچه تداخل سنجی راداری

اولین گزارش از به کارگیری 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]. پس از آن، 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 بعداً توسط زبکر و گلد اشتاین توسعه داده شد که تکنیکهای تحلیل رقومی را برای بیان یک اینترفراگرام با استفاده از دو تصویر مختلط^۲ با 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 سانتی متر می تواند استفاده شود [۵]. پیشرفتهای اخیر، شامل استفاده از تداخل سنجی راداری ماهواره ای برای مطالعه پدیده های دینامیکی است. اولین نقشه جابجایی زلزله توسط مسونت و دیگران در ۱۹۹۳ ارائه شد که یک

^۱Interferometric Synthetic Aperture radar (InSAR)

^۲Complex image

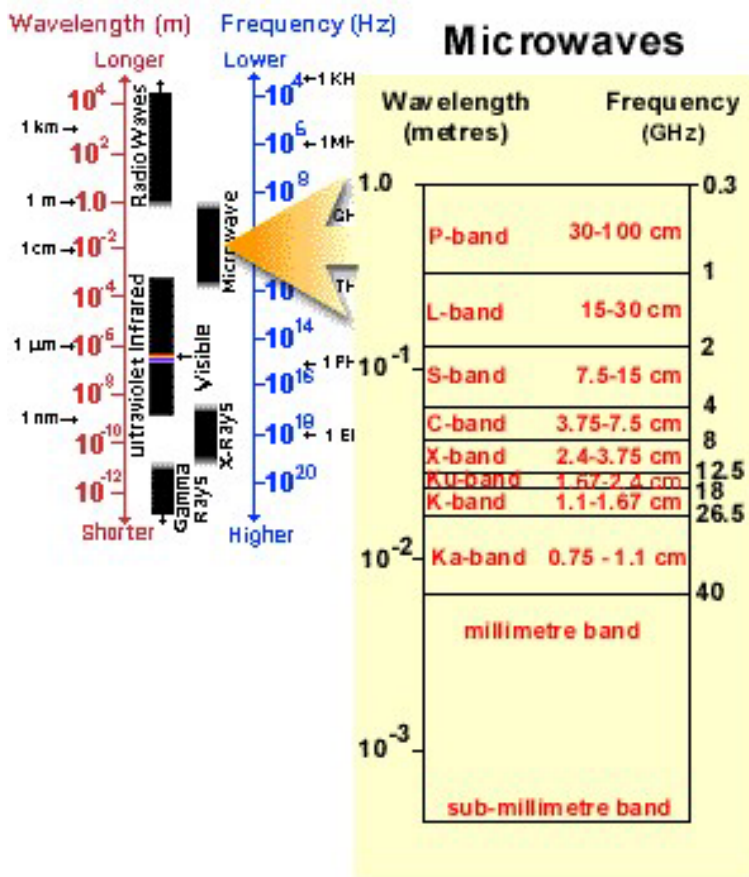
اینترفراگرام رادار با دریچه مصنوعی را با یک مدل ارتفاعی رقومی ترکیب کرده بودند [۶]. تصویرهای راداری که برای ایجاد اینترفراگرام استفاده شده بودند، قبل و بعد زلزله گرفته شده بودند. با حذف اثر توپوگرافی با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، جابجایی زلزله در راستای خط دید ماهواره نمایش داده می شد.

با ترکیب سه تصویر راداری به عنوان دو جفت اینترفراگرام، زبکر و همکاران در ۱۹۹۴ توانستند اثر توپوگرافی و دینامیکی را جدا کنند و میدان جابجایی را تنها با استفاده از داده های راداری استخراج کنند. همچنین آنها نتایج خود را با اطلاعات مثلث بندی 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 ماهواره های ERS-1 و ERS-2 که داده های مورد نیاز تداخل سنجی را با فاصله زمانی یک روز فراهم می کردند، توسعه یافت. پس از آن تحقیقات علمی مختلفی با پرتاب ماهواره ENVISAT مطرح شد. پس از آن ماهواره های مختلفی همچون COSMO-RADARSAT, ALOS, TerraSAR-X, Sentinel-1 و Skymed با طول موجهای مختلف و با قابلیت تصویربرداری در بازه های 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 باز پراکنش کننده های پایدار به منظور افزایش دقت نتایج حاصل از این تکنیک معرفی شده است [۹].

۲-۲ تصاویر راداری

رادارها در قسمت مایکروویو طیف الکترومغناطیس، بالای مناطق مرئی و مادون قرمز حرارتی کار می کنند. رادارهای تصویربرداری شامل طول موجهای 1mm-1m هستند. کار در محدوده مایکروویو طیف الکترومغناطیس نفوذ سیگنال را مخصوصا برای اتمسفر بهبود داده است (شکل ۱-۲).



شکل ۲-۱ طیف امواج الکترومغناطیس که در رادار استفاده می‌شود [۱۰].

رادارها تنوعی از خصوصیات ارزشمند برای دانشمندان علوم زمین دارند. رادار یک سنجنده فعال^۳ است، یک سیگنال انرژی الکترومغناطیسی را انتقال می‌دهد، زمین را روشن می‌کند و پاسخ بازگشتی از سطح را اندازه‌گیری 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 (بری و ...) هستند.

^۳Active

۲-۳ هندسه تصویربرداری راداری

جهت حرکت سنجنده، جهت آزمون و جهت عمود بر حرکت سنجنده، جهت برد نامیده می شود. همان طور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده است، برد نزدیک^۴، نزدیک ترین قسمت عرض تصویر به خط نادیر است. برد دور^۵، دورترین قسمت عرض تصویر به خط نادیر است. عرض گذر^۶، فاصله بین دو برد دور و برد نزدیک است. برد مایل^۷، فاصله سنجنده تا هدف در جهت برد است. زاویه دید^۸، زاویه بین خط نادیر و برد مایل (خط دید) است. فاصله برد زمینی^۹، تصویر فاصله مایل روی زمین است. زاویه برخورد^{۱۰}، زاویه بین اشعه رادار و خط عمود بر سطح زمین است. زاویه فرونشینی^{۱۱}، متمم زاویه دید است.

^۴Near range

^۵Far range

^۶Swath width

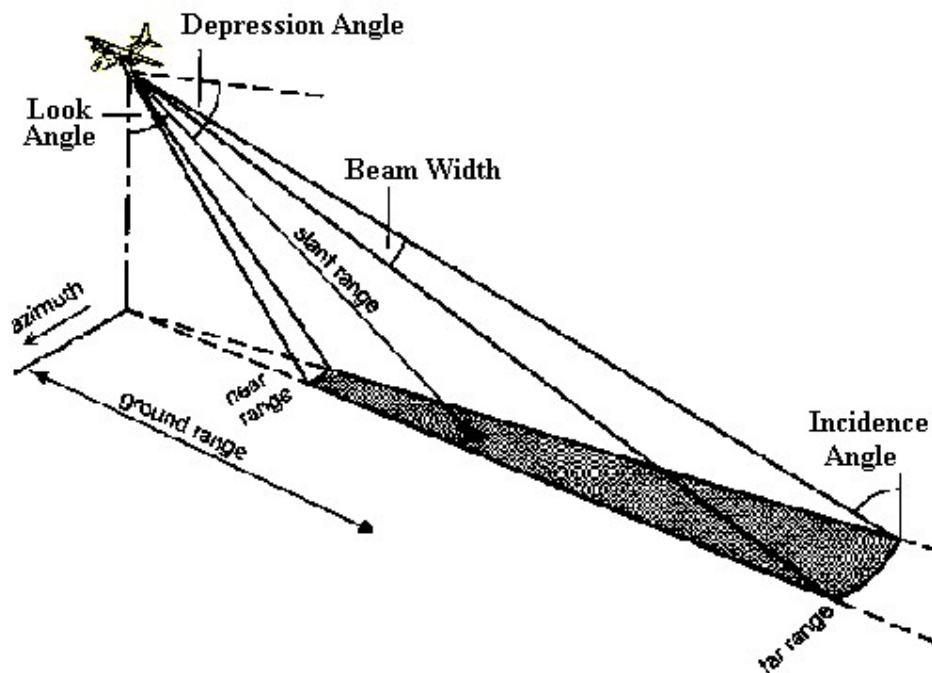
^۷Slant range

^۸Look angle

^۹Ground range

^{۱۰}Incident angle

^{۱۱}Depression angle



شکل ۲-۲ هندسه تصویر راداری [۱۰].

۲-۴ قدرت تفکیک مکانی تصاویر راداری

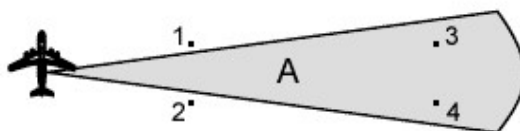
قدرت تفکیک مکانی در تصاویر راداری در دو جهت مورد بحث قرار می گیرد: جهت حرکت سنجنده (جهت آزیموت) (شکل ۲-۳) و جهت عمود بر حرکت سنجنده (جهت برد) (شکل ۲-۴).

۱- قدرت تفکیک مکانی در راستای آزیموت: قدرت تفکیک مکانی در امتداد مسیر حرکت (آزیموت) یک سیستم رادار با درجه حقیقی^۲ ثابتی از نسبت طول موج به طول آنتن است. هرچه نسبت طول موج به طول آنتن کمتر باشد، قدرت تفکیک مکانی بهتر است. بنابراین کاهش طول موج یا افزایش طول آنتن قدرت تفکیک مکانی زمینی بهتری در جهت آزیموت فراهم می کند. قدرت تفکیک مکانی آزیموتی طبق رابطه زیر به دست می آید [۱۰]:

$$A_R = \frac{H\lambda}{l \cos \varphi} \quad (۱-۲)$$

^۲Real aperture radadr (RAR)

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



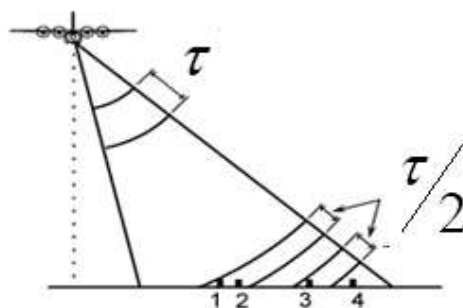
شکل ۲-۳ قدرت تفکیک مکانی در راستای آزیموت آزیموتی [۱۰].

در شکل (۳-۲) که بیانگر قدرت تفکیک مکانی در راستای آزیموت است، اشیای ۱ و ۲ قابل تفکیک هستند، ولی ۳ و ۴ به عنوان یک شی به نظر می رسند.

۲- قدرت تفکیک مکانی در راستای برد: قدرت تفکیک در جهت عمود بر حرکت سنجنده متناسب با عرض پالس انتقال یافته است، بنابراین پالسهای باریک، قدرت تفکیک مکانی خوبی در راستای برد ایجاد می کنند.

$$G_r = \frac{c\tau}{2\sin\varphi} \quad (2-2)$$

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

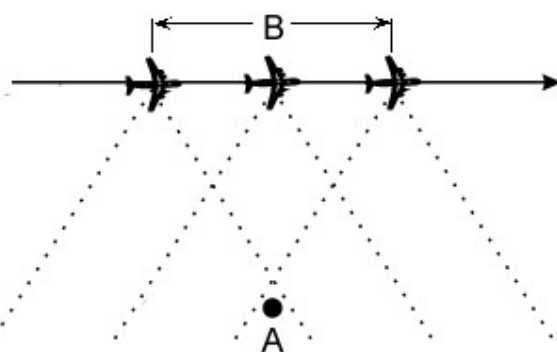


شکل ۲-۴ قدرت تفکیک مکانی برد [۱۰].

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

۵-۲ رادار با دریچه مصنوعی^{۱۳}

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



شکل ۵-۲ رادار با دریچه مصنوعی، سیگنالها طوری پردازش می‌شوند که گویا توسط آنتن با طول مصنوعی B دریافت شده‌اند [۱۰].

^{۱۳}Synthetic aperture radar (SAR)

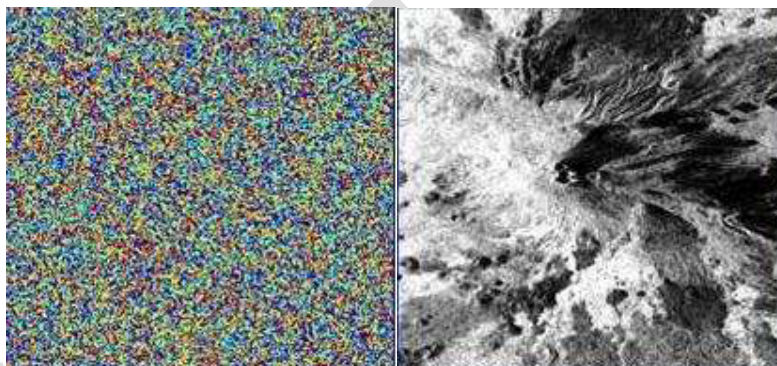
با این تکنیک قدرت تفکیک مکانی در جهت آزیموت هزار برابر بهبود می یابد که مثل آن است که از یک آنتن تصویربرداری به طول ۲۰ کیلومتر استفاده کرده باشیم [۱۱].

۶-۲ دامنه و فاز در تصاویر راداری

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

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right) \quad (۳-۲)$$

$$a = \sqrt{\text{Im}^2 + \text{Re}^2} \quad (۴-۲)$$



شکل ۶-۲ تصویر مختلط راداری، الف) دامنه تصویر، ب) فاز تصویر

دامنه تصاویر، نشانگر سطح جاروب شده توسط رادار است. یک دریاچه آرام در تصویر راداری سیاه به نظر می رسد، زیرا سطح آب به عنوان یک منعکس کننده کامل عمل کرده و سیگنال تابیده شده را کاملاً از ماهواره دور می کند.

فاز برای هر پیکسل، وابسته به فاصله زمین تا ماهواره، تاخیر فاز در اتمسفر، جابجایی سطح زمین و شیفت فاز در اثر برخورد به سطح زمین است. هر پیکسل شامل صدها المان است که هر کدام ضریب انعکاس مختلط متفاوتی داشته و در نتیجه شیفت متفاوتی در فاز در اثر 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. در هر صورت تفاضل فازهای دو تصویر که در هندسه‌ای مشابه از یک منطقه گرفته شده‌اند می‌تواند این قسمت تصادفی را جدا کند. بنابراین با مقایسه تصاویر راداری که از یک منطقه گرفته شده است، می‌توان اطلاعات مفید را استخراج نمود. تداخل سنجی راداری بر مبنای این مقایسه پایه نهاده شده است.

۷-۲ تداخل سنجی راداری

تداخل سنجی راداری^۵ تفاضل فازهای دو تصویر گرفته شده از یک صحنه اختلاف ارتفاع منطقه را استخراج می‌کند و به این ترتیب مدل رقومی زمین را با صحت چندین ده متر به دست می‌آورد [۱۲]. تفاضل فازهای دو تصویر، نوع جدیدی از تصویر است که اینترفراگرام نامیده می‌شود. اینترفراگرام، یک طرح تداخلی از فرینج^۶، شامل اطلاعات هندسه نسبی منطقه است. (شکل ۲-۷). هر فرینج یک طیف کامل رنگی و نشان دهنده تغییر فاز در بازه $[0, 2\pi]$ می‌باشد که جابجایی در هر فرینج برابر نصف طول موج رادار می‌باشد.

^۵Interferometric Synthetic Aperture radar (InSAR)

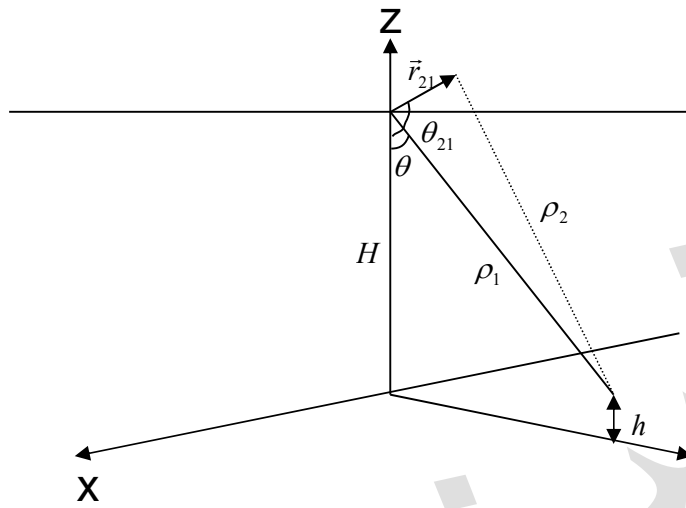
^۶fringe



شکل ۷-۲ اینترفراگرام به دست آمده از پردازش تصاویر راداری ناشی از توپوگرافی [۱۳].

۷-۲-۱ خط مبنای مکانی

فاصله بین مدار اول و مدار دوم در لحظه تصویربرداری دو تصویر راداری، خط مبنای^۷ مکانی نامیده می شود. اندازه گیری اصلی تخمین ارتفاع از موقعیت های معلوم سکو است و فواصلی که از آنتن رادار تا تارگت اندازه گیری می شود ρ_1 و ρ_2 است. خط مبنای مکانی این امکان را فراهم می کند که ارتفاعات هدف را اندازه گیری کنیم و در نتیجه توپوگرافی 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 ۸-۲ هندسه تداخل سنجی

وقتی رادار منطقه را از دو مکان متفاوت مشاهده می‌کند، توپوگرافی منطقه منجر به تولید فرینجهایی (مانند خطوط تراز) در اینترفراگرام می‌شود. تغییر ارتفاعی که موجب تولید یک فرینج می‌شود را ارتفاع ابهام^{۱۸} می‌نامیم که با رابطه زیر به دست می‌آید [۱۴] و بیانگر توان رادار برای اندازه‌گیری ارتفاع است که برای تولید مدل رقومی زمین استفاده می‌شود:

$$h_a = \frac{R_s \lambda \sin \theta_m}{2d} \quad (۵-۲)$$

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

¹⁸ 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.

۳-۷-۲ 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.

۴-۷-۲ هم بستگی تصاویر

واریانس فاز تداخلی که بیانگر میزان هم بستگی فاز تصاویر است، با رابطه زیر تعیین می شود.

$$\gamma(t) = \frac{\langle c_1 c_2^* \rangle}{\sqrt{\langle c_1 c_1^* \rangle \langle c_2 c_2^* \rangle}} \cong \frac{\sum c_1 c_2^*}{\sqrt{\sum c_1 c_1^* \sum c_2 c_2^*}} \quad (6-2)$$

کاربردهای تصویر هم بستگی در بررسی کیفیت اینترفراگرام (از حیث نویز دار بودن)، ثبت هندسی^۹ تصاویر، در مرحله بازیابی فاز و همچنین طبقه بندی سطح زمین (آب، گیاه، ساختمان) است.

۲-۸ تداخل سنجی راداری تفاضلی

با استفاده از تداخل سنجی تفاضلی می توان 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 اینترفروگرام دیگر و یا دسترسی به مدل ارتفاعی رقومی زمین نیاز داریم. با این تکنیک به صحت در حد میلی متر یا سانتی متر برای سرعت تغییر شکل زمین می توان 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 می شود. وقتی خط مبنای مکانی به قدر کافی کوچک باشد (در حد چند متر)، پردازش تداخل سنجی راداری نقشه جابجایی ایجاد شده در منطقه را ایجاد می کند. 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 مورد نیاز برای محاسبه میدان جابجایی زمین با استفاده از اندازه گیری های رادار با دریچه مصنوعی وقتی سهم فاز توپوگرافی منطقه و اثرات جابجایی قابل توجه است، به دست می آید. وقتی یک اینترفراگرام از تفاضل فازهای دو تصویر به دست آمد، فاز تداخل سنجی به صورت زیر تعریف می شود [۱۴]:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \rho(\rho_2 - \rho_1) \quad (7-2)$$

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

$$\delta\rho \cong -B \sin(\theta - \alpha) \quad (8-2)$$

$B_{\parallel}$ مولفه خط مبنا در جهت موازی با خط دید است؛ که با در نظر گرفتن رابطه (۷-۲) و (۸-۲) برای تداخل

سنجی با مسیر تکراری خواهیم داشت:

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(\delta\rho) = -\frac{4\pi}{\lambda}B_{\parallel} \quad (9-2)$$

اگر اینترفراگرام دومی از همان منطقه اخذ شود، طوری که یک مدار آن با زوج قبلی طوری مشترک باشد که θ و ρ ثابت بماند، فازهای این دو اینترفراگرام می توانند با هم مقایسه شوند. این اینترفراگرام با ترکیب دو اندازه گیری

α' و توجیه خط مبنای B' دوم با یک خط مبنای متفاوت اخذ شده است، به طوری که داریم:

$$\frac{\phi'}{\phi} = \frac{B'_{\parallel}}{B_{\parallel}} \quad (10-2)$$

به عبارتی نسبت فازهای اندازه گیری شده در دو اینترفراگرام برابر نسبت مولفه موازی خط مبنا با خط دید است. فازهای این رابطه فازهای مطلق (بازیابی شده) متناسب با تفاوت بردها است.

اگر یک جابجایی سطحی (مثل زلزله) المانهای اینترفراگرام دوم را جابجا کرده باشد، با فرض اینکه این جابجایی ها در یک 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 در نتیجه جابجایی $\Delta\rho$ در جهت خط دید ماهواره ایجاد می شود. برای این اینترفراگرام داریم:

$$\phi' = \phi'_1 - \phi'_2 = \frac{4\pi}{\lambda}(\rho_2 + \Delta\rho - \rho_1) = \frac{4\pi}{\lambda}(-B'_{\parallel} + \Delta\rho) \quad (11-2)$$

اگر داده اینترفراگرام اول در نسبت مولفه های موازی خط مبنا ضرب و از اینترفراگرام دوم کم شود، به معادله ای که تنها وابسته به جابجایی سطح است، می رسیم:

$$\phi' - \phi \frac{B'_{\parallel}}{B_{\parallel}} = \frac{4\pi}{\lambda}(\Delta\rho) \quad (12-2)$$

با توجه به نسبت خط مبناهای موازی:

$$\frac{B'_{\parallel}}{B_{\parallel}} = \frac{\sin(\theta - \alpha')}{\sin(\theta - \alpha)} \quad (13-2)$$

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 غیرمستقیم که توسط زیگر در ۱۹۹۴ ارائه شد [۱۵]، نقشه جابجایی را بدون استفاده از اطلاعات قبلی از منطقه استخراج می‌کند. ابتدا بخشی از فاز که حتی در غیاب توپوگرافی روی زمین وجود دارد، حذف می‌شود. فازی که نسبت به اثر زمین کروی اصلاح می‌شود طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\phi_{flat} = -\frac{4\pi}{\lambda} B(\sin(\theta - \alpha) - \sin(\theta_0 - \alpha)) \quad (2-14)$$

که در این رابطه θ_0 زاویه دید برای هر نقطه در عکس با فرض داشتن یک ارتفاع مرجع محلی ثابت است. فاز اینترفراگرام پس از این تصحیح نتیجه تغییر ارتفاعی نسبت به سطح مرجع کروی و جابجایی‌های در نتیجه حرکت صحنه است.

با توجه به اینکه تفاوت θ واقعی از θ_0 کوچک است، با بسط رابطه (۲-۱۴) داریم:

$$\phi_{flat} = -\frac{4\pi}{\lambda} B(\cos(\theta_0 - \alpha))\delta\theta \quad (2-15)$$

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

نباشد، در اعوجاج زاویه‌ای توپوگرافی، $\delta\theta$ است. بنابراین نسبت $\frac{\phi_{flat}}{\phi'_{flat}}$ حالا به جای اینکه تابع θ باشد، تابع θ_0

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

$$\phi'_{flat} = -\frac{4\pi}{\lambda} B' \cos(\theta_0 - \alpha')\delta\theta + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho \quad (2-16)$$

بنابراین بیان دیگری از معادله فاز تفاضلی رابطه (۲-۱۲) بر حسب فاز مسطح شده به صورت زیر است:

$$\phi'_{flat} - \phi_{flat} \frac{B' \cos(\theta_0 - \alpha')}{B \cos(\theta_0 - \alpha)} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho$$

(۱۷-۲)

با این تابع، جابجایی $\Delta\rho$ مستقیماً بدون نیاز به مقدار دقیق θ به دست می آید.

اگر خط مبنایی که در عملیات مسطح سازی رابطه (۱۴-۲) استفاده می شود، درست نباشد، معادله (۱۵-۲) 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 (۱۷-۲) نسبت به ارتفاع و جابجایی به دست آید، حساسیت ارتفاعی با رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{\partial \phi'}{\partial \theta} = \frac{4\pi}{\lambda} B' \cos(\theta_0 - \alpha') \quad (۱۸-۲)$$

با استفاده از $\delta h = \rho \sin \theta \delta \theta$ داریم:

$$\frac{\partial \phi'}{\partial h} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B' \cos(\theta - \alpha')}{\rho \sin \theta} \quad (۱۹-۲)$$

معادله حساسیت جابجایی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \phi'}{\partial (\Delta\rho)} = \frac{4\pi}{\lambda} \quad (۲۰-۲)$$

است، از معادله (۱۹-۲) و (۲۰-۲) واضح است که فاز به تغییرات سطح حساس تر است تا به توپوگرافی.

از آنجا که ρ خیلی بزرگتر از B است، بنابراین وقتی تداخل سنجی راداری برای اندازه گیری توپوگرافی با صحت چند متر استفاده می شود، امکان تعیین جابجایی در حد میلی متر یا سانتی متر وجود دارد. این نسبت، حساسیت قدرت تکنیک های تداخل سنجی را برای تعیین جابجایی های سطحی کوچک یا تغییر شکل معلوم می کند.

$$\frac{4\pi}{\lambda} \Delta\rho = 2\pi \quad (۲۱-۲)$$

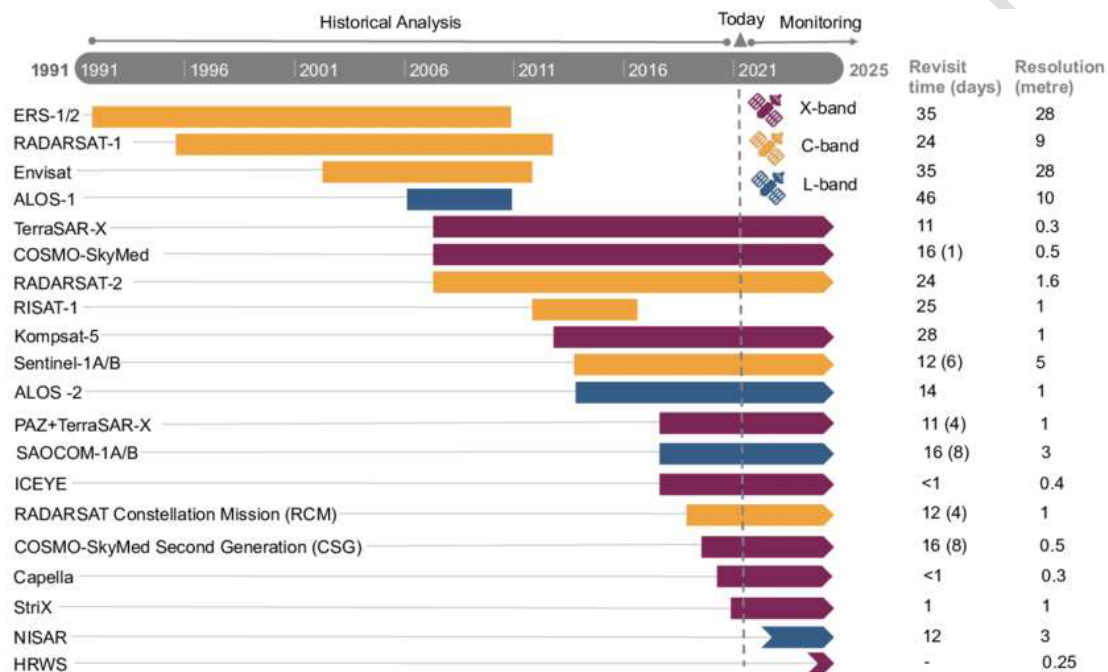
$$\Delta r = \frac{\lambda}{2} \quad (۲۲-۲)$$

طبق رابطه اخیر جابجایی در یک فرینج برابر نصف طول موج می باشد، بنابراین با شمردن تعداد فرینجها و ضرب آنها در نصف طول موج، جابجایی سطح زمین محاسبه می شود.

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

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

جدول ۲-۱ سیستمهای ماهواره‌ای مناسب برای تکنیک تداخل سنجی [۱۶]



۲-۸-۴ مراحل استخراج بردار جابه‌جایی از فاز تصویر (تهیه نقشه تغییر)

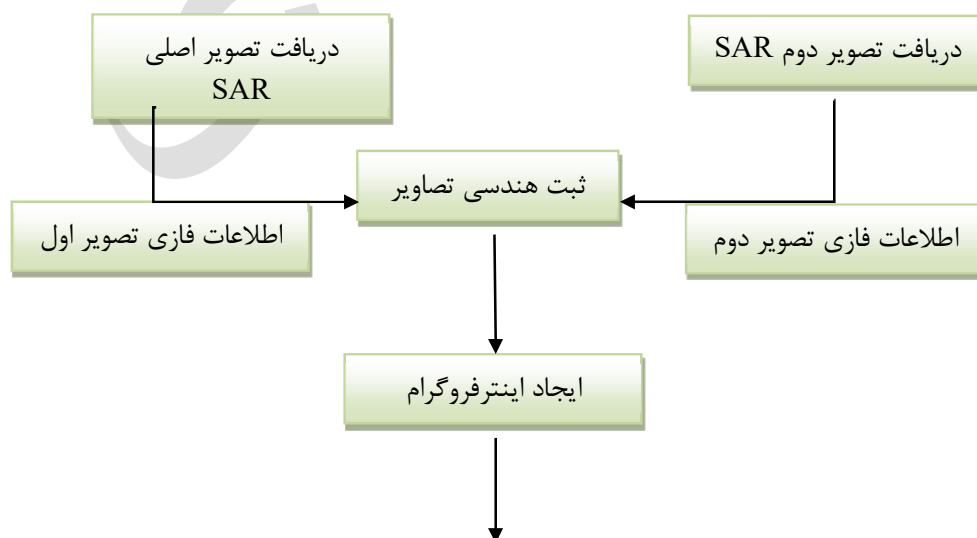
استخراج بردار جابه‌جایی از تصاویر راداری در ۶ مرحله صورت می‌گیرد (شکل ۲-۹). ابتدا دو تصویر نسبت به هم ثبت هندسی می‌شوند، در این مرحله خطاهای هندسی که مربوط به تفاوت موقعیت آنتن سنجنده حین تهیه تصویر از یک منطقه است، حذف می‌شود. سپس با ضرب مختلط این دو تصویر که ثبت هندسی شده‌اند، فازهای

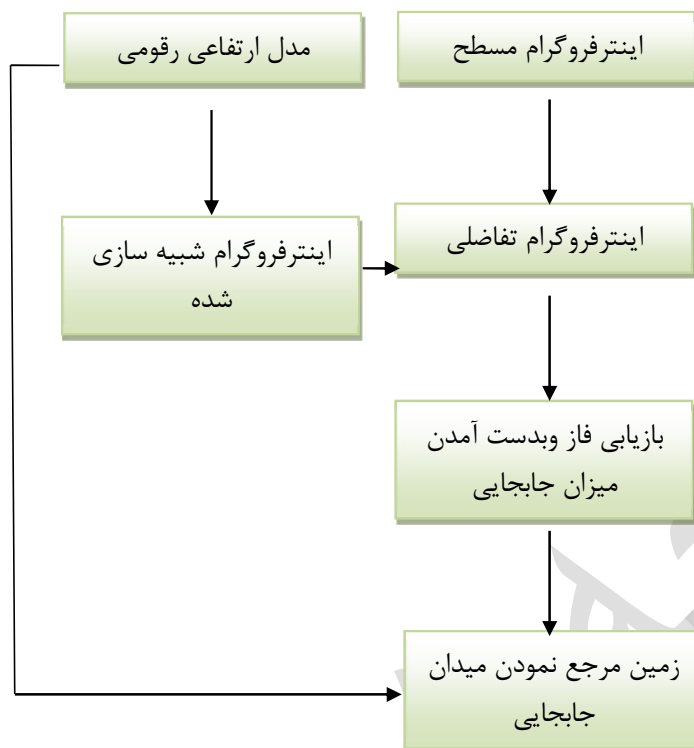
پیکسل های متناظر از هم کم می شود و اینترفراگرام ایجاد می شود. در این مرحله، همچنین همبستگی دو تصویر محاسبه می شود. همبستگی دو تصویر، قابلیت اطمینان اندازه گیری فاز را اندازه می گیرد.

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 شبیه سازی 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 داده های راداری است. از آنجایی که بازیابی فاز کار آسانی نیست و امکان است منجر به خطاهایی شود، مخصوصا مکانهایی که فرینجها به هم فشرده و یا ناپیوسته هستند، چنین خطاهایی به عنوان اطلاعات توپوگرافی نادرست در اینترفراگرام نهایی بازیابی می شوند و تشخیص آنها آسان نیست. برای اجتناب از تفسیر چنین نتایجی مناطق دشوار در اینترفراگرام حذف می شوند.





شکل ۹-۲ مراحل استخراج بردار جابه‌جایی از فاز تصویر

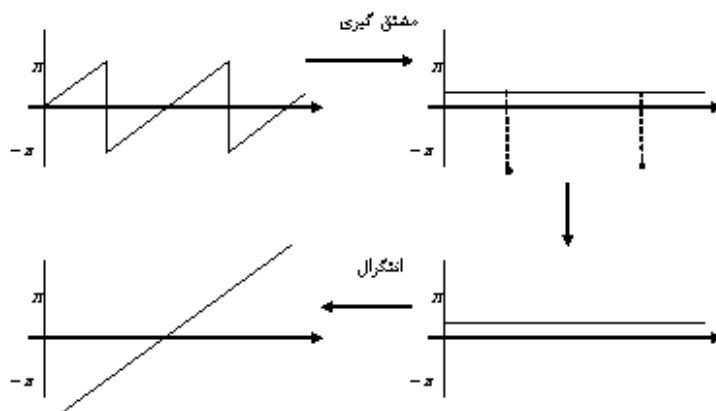
این روش براین فرض استوار است که جفت تصویری که برای تخمین توپوگرافی استفاده می‌شود، شامل هیچ تغییر شکلی نیست و منطقه بین دو اخذ داده ثابت بوده است. بنابراین، این روش برای جابجایی‌های تدریجی قابل‌استفاده نیست. علاوه براین یک اینترفراگرام همیشه شامل اثر اتمسفر است که این اثر اتمسفری نیز در صورتی که حذف 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 اندازه‌گیری شده در اینترفراگرام بازیابی کنیم. در اغلب موارد مناطق با همبستگی پایین

و نویز بالا موجب دشوار شدن این مرحله می شوند. دو روش اصلی برای بازیابی فاز موجود است: خطوط برش^۲ و روش کمترین مربعات^۱ که هر کدام برای کاربردهای خاصی مناسب است. هر دو الگوریتم ابتدا گرادیان میدان فاز را اندازه گیری کرده، سپس انتگرال می گیرند تا به فازهای بازیابی برسد (شکل ۲-۱۰).

در روش خطوط برش که یک روش محلی است، بازیابی به صورت پیکسل به پیکسل انجام می شود. در این روش ابتدا باقی مانده ها^۳ در 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 ناسازگاریهای فاز را جدا می کند، اما انتخاب مکان صحیح خطوط برش دشوار است.

در روش 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 ناسازگاریهای فاز می شود.



شکل ۲-۱۰ مراحل بازیابی فاز

^۲branch cut

^۱Least square

^۳resi due

نهایتاً پس از حذف اثر توپوگرافی و بازیابی فاز، تصاویر زمین مرجع شده و مختصاتهای کارترین روی بیضوی به سیستم زمینی تبدیل می‌شوند. عملیات زمین مرجع سازی نتایج، با استفاده از مدل‌های هندسی و به کارگیری داده های مداری دقیق ماهواره و مدل رقومی زمین انجام می شود و در مواردی که به دقت بالاتری برای این عملیات نیاز است، از نقاط کنترل زمینی استفاده می شود.

۲-۸-۵ عوامل مؤثر بر دقت برآورد جابجایی

پارامترهای مؤثر بر دقت ارتفاعی استخراج شده از اینترفراگرام، صحت خط مبنا و فاز است. خطا در وضعیت خط مبنا (پارامترهای مداری)، موجب ایجاد خطای سیستماتیک در فاز اینترفراگرام می‌شود که در کل مدل یکسان است و با تعدادی نقطه کنترل قابل حذف است. از دیگر منابع ایجاد خطا در اینترفراگرام، خطای فاز است 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^۳ تا حدودی کاهش می‌یابد.

از آنجاکه اتمسفر محیط همگنی نیست، موجب ایجاد شیفت اضافه‌ای در فاز اندازه‌گیری شده می‌شود. با استفاده از آنالیز سری زمانی متداول و یا مبتنی بر پراکنش کننده‌های پایدار^۴ قادر به کاهش اثر اتمسفر در نتایج خواهیم بود. همچنین می‌توان با استفاده از مدل‌های اتمسفری موجود این خطا را از مشاهدات حذف نمود.

^۳multi looking

^۲ Persistent Scatterer

۲-۸-۶ کاربردهای تداخل سنجی راداری

نقشه میدان جابجایی سطح زمین به دست 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 مورد توجه قرار گرفته است [۱۷ و ۱۸ و ۱۹ و ۲۰ و ۲۱ و ۲۲].

۲-۹ روش باز پراکنش کننده های پایدار

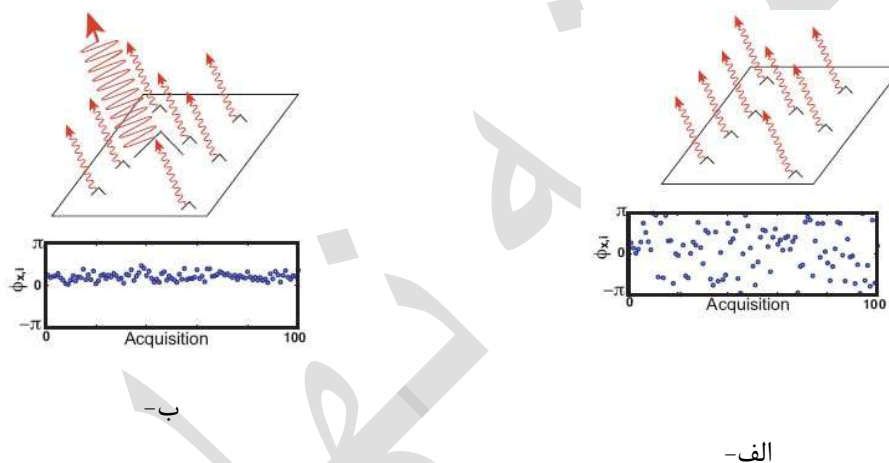
در مناطقی که مولفه جابجایی سطحی زمین کم بوده و نیز تصاویر راداری دچار عدم همبستگی زمانی شوند، نمی توان از تکنیک تداخل سنجی راداری متداول استفاده نمود. روش باز پراکنش کننده های پایدار در مناطقی که تصاویر دچار عدم همبستگی زمانی می شوند و همچنین داده های راداری از نقطه نظر طول خط مبنای مکانی و زمانی دارای توزیع نامناسبند، استفاده می شود. همچنین به کمک این روش می توان دقت اندازه گیری جابجایی سطح زمین را از طریق برآورد مولفه های مختلف خطا همچون خطای اتمسفری و توپوگرافی بهبود داد. تکنیک باز پراکنش کننده های 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 محدودیت های روش تداخل سنجی متداول فرتی و همکارانش تکنیک باز پراکنش کننده های پایدار را ارائه کردند [۲۳]. پراکنش کننده های پایدار عوارضی هستند که ویژگی های پراکنشی آنها در طول زمان ثابت است و دچار عدم همبستگی زمانی و مکانی نمی شوند. این عوارض که عمدتاً سازه های دست بشر هستند، دچار عدم همبستگی زمانی نمی شوند. پیکسل هایی وجود دارند که در آنها یک پراکنش کننده در مقدار موج باز پراکنش شده در آن پیکسل غالب است و مانند یک نقطه ای دائم رفتار می کند؛ بنابراین مقدار عدم همبستگی به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

شکل ۲-۱۱ پراکنش کننده هایی را که در مقدار فاز برگشتی از پیکسل شرکت دارند، نشان می دهد. شکل ۲-

۱۱-الف فاز موج راداری را اگر در طول زمان باز پراکنش کننده های درون یک پیکسل به طور تصادفی به اندازه

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 اندازه‌گیری نمود. نمودار ترسیم‌شده 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 [۲۳].



شکل ۲-۱۱ پراکنش کننده‌هایی که در مقدار فاز برگشتی از پیکسل شرکت دارند، الف: پیکسل بدون پراکنش کننده پایدار، ب: پیکسل دارای پراکنش کننده پایدار [۲۴].

بنابراین 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 قابل استفاده 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.

تاکنون روش های متفاوتی در استفاده از پراکنش کننده های پایدار ارائه شده است. اولین بار فرتی و همکارانش در روشی که پراکنش کننده های پایدار نامیده شد، پیکسل هایی را به عنوان پراکنش کننده پایدار انتخاب نمودند که تاریخچه رفتار فازی آنها منطبق بر یک مدل فرضی از چگونگی تغییر جابجایی در زمان باشد. از نقطه نظر فیزیکی، این پراکنش کننده نقطه ای می تواند یک ساختمان، یک تخته سنگ بزرگ و مجزا و یا سطح یک سنگ در جریان سرد شدن مواد مذاب باشد. این روش در تصاویر مناطقی که به وفور دارای عوارض دست ساز بشر بودند، بسیار موفق بوده است.

در روش پیشنهادی فرتی و همکارانش به دلیل استفاده از یک مدل تابعی^۵ برای رفتار سنجی جابجایی در زمان و تشخیص پراکنش کننده پایدار، دانش تقریبی اولیه از نحوه رفتار جابجایی در زمان مورد نیاز است. در این روش معمولاً رفتار جابجایی به صورت 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 کننده های پایدار StaMPS که توسط دانشگاه استنفورد ارائه شده است، با استفاده از تحلیل فاز می توانیم بسیاری از نقاط پراکنش کننده پایدار را که حتی در مناطق غیر شهری (عاری از بازتابنده های گوشه ای) قرار دارند، مشخص نماییم [۲۴]. در این روش به جای استفاده از یک مدل زمانی برای تغییر شکل از همبستگی مکانی اندازه گیری فاز استفاده می کند، به همین دلیل در مناطقی که جابجایی دارای رفتار غیر ثابت و نامشخص است می توان از این روش استفاده کرد. زمانی که پراکنش کننده های پایدار مشخص شدند، این الگوریتم مراحل مختلفی را برای حذف اثرات اتمسفر، خطای توپوگرافی و خطای مداری به کار خواهد برد.

در این روش ابتدا تعدادی نقطه به عنوان پراکنش کننده های 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

^۵Functional model

بررسی می‌شود. فاز یک اینترفراگرام از بخشهای متفاوتی تشکیل شده‌اند که عبارتند 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 می‌گیرد. در هر تکرار معیاری به نام همبستگی زمانی که بیان‌کننده تغییرات فاز باقیمانده است، محاسبه می‌گردد. این معیار شاخصی برای تشخیص آنکه آیا این پیکسل پراکنش کننده پایدار است، می‌باشد. سپس احتمال آنکه یک پیکسل پراکنش کننده پایدار 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 می‌شود. بازیابی فاز از دو مرحله اصلی تشکیل شده است: ابتدا داده‌ها در بعد زمان بازیابی می‌شوند. در این مرحله به‌منظور کاهش اثر اتمسفر از اختلاف فاز دو پیکسل مجاور استفاده می‌شود؛ 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 اختلاف فاز دو پیکسل مجاور در بعد زمان و مکان کمتر از نیم سیکل یعنی π می‌باشد. در مرحله بعد اختلاف فاز بازیابی شده بین دو پیکسل مجاور برای ساخت یک تابع هزینه به‌منظور بازیابی فاز در بعد مکان استفاده می‌شود. سری زمانی اختلاف فاز بازیابی شده در فرآیند بهینه‌سازی الگوریتم دوبعدی برای دستیابی به فاز نهایی بازیابی شده استفاده می‌گردد.

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

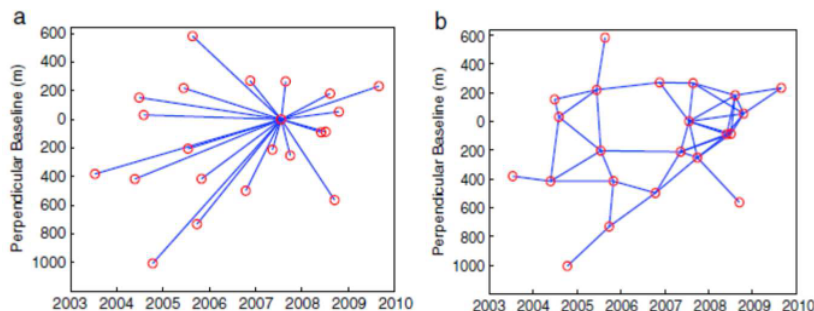
اختلاف فاز دو پیکسل مجاور استخراج می گردد. پس از برآورد این دو نوع فاز، آنها از فاز بازیابی شده کسر شده و سیگنال جابجایی به دست می آید.

روش StaMPS قادر است پراکنش کننده های پایدار با تغییر شکل متغیر در زمان را شناسایی کند و از آنجاکه در انتخاب پراکنش کننده های پایدار از تحلیل فاز استفاده می کند، می تواند در مناطقی که عاری از عوارض دست ساز بشری است، مورد استفاده قرار گیرد. روشهایی که تنها بر اساس تحلیل دامنه کار می کنند، تنها قادر خواهند بود عوارضی مثل بازتابنده های گوشه ای که برگشت قوی به سمت سنجنده دارند را مشخص می کنند و از یافتن باز پراکنش کننده های پایدار که برگشت قوی به سمت سنجنده ندارند، اما در طول زمان ویژگیهای باز پراکنش کننده پایدار دارند، مانند یک قطعه سنگ، عاجزند.

برخلاف روش خط مبنای کوتاه^۶ 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 می دهد. 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 می شوند. 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 می باشد که منجر به فاز اضافی در تصویر می شود. بخار آب بیشترین تأثیر را در اثر اتمسفر دارد. پس از تشکیل اینترفروگرامها نسبت به یک تصویر پایه و شناسایی پیکسل پراکنش کننده پایدار، سیگنال مربوط به تأخیر اتمسفری با فیلتر کردن فاز نهایی سری زمانی به دست آمده برای هر پیکسل پراکنش کننده پایدار، تخمین زده شده و حذف می شود.

^۶Small baseline method



شکل ۲-۱۲ نمایش خط مبناها برای الف: روش پراکنش کننده پایدار، ب- روش خط مبنا کوتاه. دایره‌ها نشان‌دهنده تصاویر و خطوط نمایش اینترفروگرام‌های تشکیل شده است [۲۵].

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

در حقیقت دو تکنیک باز پراکنش کننده‌های پایدار و خط مبناهای کوتاه مکمل یکدیگر هستند. با تلفیق این دو تکنیک نمونه‌برداری مکانی سیگنال موردنظر بیشینه می‌شود. با افزایش نمونه‌برداری مکانی علاوه بر افزایش قدرت تفکیک مکانی سیگنال تغییر شکل، عملیات بازبازی فاز که تخمین تعداد سیکل‌های مبهم فاز است، با اطمینان بیشتری تخمین زده می‌شود. هوپر در سال ۲۰۰۸ در روش جدیدی دو تکنیک باز پراکنش کننده‌های پایدار و خط مبناهای 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 به عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری سطح زمین اشاره شد و به موارد کاربرد این روشها و مزایای هر کدام پرداخته شد.

نقشه نهایی

فصل سوم

استخراج میدانهای جابجایی از تصاویر

راداری

فصل سوم استخراج میدانهای جابجایی از تصاویر راداری

اندازه گیری جابجایی های زمین یک هدف کلیدی در مدیریت بحران می باشد. امروزه تکنیک تداخل سنجی راداری به عنوان یک تکنیک متداول برای مطالعات جابجایی سطح زمین استفاده شده است؛ اما به هر صورت این تکنیک محدودیت هایی 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.

۳-۱ اندازه گیری جابجایی سه بعدی سطح زمین با استفاده از داده های تداخل سنجی راداری

یکی از محدودیت های تکنیک تداخل سنجی راداری اندازه گیری مقدار جابجایی در راستای خط دید ماهواره است. با در اختیار داشتن سه اینترفراگرام در هندسه های تصویربرداری متفاوت می توان به سه مولفه جابجایی سطح زمین رسید. غالبا تعیین مولفه شمالی جابجایی با استفاده از داده های ماهواره های با مدارهای قطبی با مشکل مواجه است، ولی یک ماهواره با زاویه میل^۱ حدود $60^{\circ}/120^{\circ}$ 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 نمانتین آلاسکا را با استفاده از چند اینترفراگرام در هندسه های متفاوت به دست آورند [۲۷]. این زلزله اولین زلزله ای 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^۲ و پایین گذر^۳ با دو زاویه برخورد متفاوت از ماهواره ENVISAT، تصاویر با مشاهده راست نگر و چپ نگر در دو آزمون متفاوت از ماهواره EVINSAT و تصاویر با مشاهده راست

^۱ inclination

^۲ ascending

^۳ descending

نگر و چپ نگر در دو آزمون متفاوت و دو زاویه برخورد مختلف کار کردند. دقت مولفه شمالی در روش اول قابل مقایسه با دقت حاصله از روش آزمون 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 می دهد، 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 (۳-۱) به دست می آید:

$$[u_n \sin \theta - u_e \cos \theta] \sin i + u_u \cos i + \delta_r = r \quad (۳-۱)$$

که در این رابطه θ آزمون 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:

$$r = -\hat{p}u + \delta_r \quad (۳-۲)$$

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 می باشد.

در حالتی که ۲ تصویر مربوط به مسیر بالاگذر و ۲ تصویر مربوط به مسیر پایین گذر در همان بازه زمانی تصاویر بالاگذر و در همان مکان، در اختیار داریم، برای هر پیکسل روی زمین دو مشاهده جابجایی وجود دارد (شکل ۳-۱)، دو بردار جابجایی در راستای خط دید ماهواره مربوط به اینترفراگرامهای بالاگذر و پایین گذر. این مشاهدات را با ماتریس R نشان می دهیم که $R = (r_1, r_2, r_3, r_4)^T$ که r_i جابجایی در جهت خط دید ماهواره برای جهات مختلف مشاهده است و داریم:

$$R = -Pu + \Delta \quad (۳-۳)$$

اگر $\sum_R^{-1}$ ماتریس کوواریانس خطای تغییرات برد مشاهده شده باشد، داریم:

$$\hat{u} = -\left[P^T \sum_R^{-1} P\right]^{-1} P^T \sum_R^{-1} R \quad (۴-۳)$$

و ماتریس کوواریانس مولفه های بردار جابجایی از رابطه زیر به دست می آید:

$$\sum_u = \left[P^T \sum_R^{-1} P\right]^{-1} \quad (۵-۳)$$

لازم به ذکر است در صورت عدم همزمانی تصاویر بالاگذر و پایین گذر نیاز به درونیابی برای همزمان نمودن نتایج می باشد.

فصل چهارم

محاسبات سری زمانی و سرعت

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 می باشد و می تواند برای پایش میدان جابجایی پوسته زمین استفاده شود. مخاطرات جابجایی سطح زمین از قبیل فرونشست، بالا آمدگی، رانش و یا زلزله می تواند به وسیله این تکنیک مورد بررسی قرار گیرد. این تکنیک به طور موفقیت آمیزی برای به دست آوردن جابجایی در مناطق مختلف جهان استفاده شده است.

هر اینترفروگرام به طور مجزا فقط حاوی تغییرات سطح در یک بازه زمانی است. با به کار بردن تعدادی اینترفروگرام به همراه آنالیز سری زمانی می توان تغییرات سطح را طی زمان مورد بررسی قرارداد. آنالیز سری زمانی با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری روشی مناسب جهت برآورد نرخ تغییرات سطح زمین در قدرت تفکیک مکانی بالا می باشد. با در دست داشتن تعداد قابل توجهی اینترفروگرام، می توان 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 می شوند. در این روش با استفاده از افزونگی اطلاعات تأثیرات خطاهای پردازشی و نویز عدم همبستگی کاهش می یابد و نتایج می تواند به منظور مدلسازی و مطالعات زمین شناسی مورد استفاده قرار گیرد.

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

$$d_{l_{12}}(mn) + d_{l_{23}}(mn) + d_{l_{13}}(mn) = 0 \quad (4-1)$$

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

$$d'_{l_{12}}(mn) = d_{l_{12}}(mn) + k \quad (۴-۲)$$

که k میزان بایاس و مقدار ثابتی است؛ بنابراین:

$$d'_{l_{12}}(mn) + d_{l_{23}}(mn) + d_{l_{13}}(mn) = k \quad (۴-۳)$$

با ترسیم هیستوگرام لوپ بسته می توان حضور بایاس در هر یک از ترکیب های خطی کنترل نمود. در نهایت اگر میزان بایاس ها برآورد شود و به طور صحیحی از نقشه های جابجایی کم شود، باقیمانده خطاها به صورت اتفاقی بوده و نقشه های جابجایی به عنوان مجموعه ای قابل اتکا برای سرشکنی کمترین مربعات خواهد بود؛ بنابراین دو بردار X و l طبق رابطه زیر با یکدیگر مرتبطند:

$$AX = L \quad (۴-۴)$$

بنابراین مشاهدات سرشکنی کمترین مربعات، شامل N نقشه جابجایی اینترفروگرام است که از تفاضل فاز M تصویر ماهواره ای 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 برقرار می کند تابعی از سرعت تغییر شکل در زمان های مختلف است.

$$l_{ij} = v_0(t_1 - t_0) + v_1(t_2 - t_1) + \dots + v_{n-1}(t_n - t_{n-1}) \quad (۴-۵)$$

به عنوان مثال اگر از تاریخ $\hat{t}_1$ تا $\hat{t}_J$ اینترفروگرامی وجود داشته باشد، این رابطه شامل تمام اینترفروگرام های ممکن در بازه زمانی $\hat{t}_1$ و $\hat{t}_J$ است. به طور مثال اگر ۵ تاریخ جمع آوری داده توالی t_0, t_1, t_2, t_3, t_4 موجود باشد و با فرض این که اینترفروگرام ها برای فواصل (t_0, t_1) و (t_0, t_2) و (t_0, t_4) و (t_1, t_2) و (t_1, t_4) و (t_2, t_3) و (t_2, t_4) در

دسترس باشد و میزان جابجایی برای این فواصل l_{01} و l_{02} و l_{04} و l_{12} و l_{14} و l_{23} و l_{24} باشد، مسئله سرشکنی کمترین مربعات به صورت زیر فرموله می شود:

(۴-۶)

$$\left\{ \begin{array}{l} l_{01} = v_0(t_1 - t_0) \\ l_{02} = v_0(t_1 - t_0) + v_1(t_2 - t_1) \\ l_{04} = v_0(t_1 - t_0) + v_1(t_2 - t_1) + v_2(t_3 - t_2) + v_3(t_4 - t_3) \\ l_{12} = v_1(t_2 - t_1) \\ l_{14} = v_1(t_2 - t_1) + v_2(t_3 - t_2) + v_3(t_4 - t_3) \\ l_{23} = v_2(t_3 - t_2) \\ l_{24} = v_2(t_3 - t_2) + v_3(t_4 - t_3) \end{array} \right.$$

که در روابط بالا v_i ($i=0,1,2,3$) میزان نرخ جابجایی مجهول برای هر یک از بازه های بالامی باشد. سیستم معادلات متناظر بالا به فرم ماتریسی به شکل زیر می باشد.

(۴-۷)

$$\underbrace{\begin{bmatrix} l_{01} \\ l_{02} \\ l_{04} \\ l_{12} \\ l_{14} \\ l_{23} \\ l_{24} \end{bmatrix}}_L = \underbrace{\begin{bmatrix} (t_1 - t_0) & 0 & 0 & 0 \\ (t_1 - t_0) & (t_2 - t_1) & 0 & 0 \\ (t_1 - t_0) & (t_2 - t_1) & (t_3 - t_2) & (t_4 - t_3) \\ 0 & (t_2 - t_1) & 0 & 0 \\ 0 & (t_2 - t_1) & (t_3 - t_2) & (t_4 - t_3) \\ 0 & 0 & (t_3 - t_2) & 0 \\ 0 & 0 & (t_3 - t_2) & (t_4 - t_3) \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}}_X$$

همانطور که گفتیم رابطه بردار مشاهدات و بردار مجهولات برابر با $AX = L$ است و همانطور که ذکر شد A

ماتریس ضرایب است. حل مساله کمترین مربعات جهت تعیین بردار جابجایی به صورت رابطه زیر می باشد:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (۴-۸)$$

که در این رابطه P ماتریس وزن مشاهدات می باشد و X میزان جابجایی برآورد شده برای بازه های مختلف می باشد.

دقت مجهولات طبق تئوری کمترین مربعات طبق فرمول زیر برآورد می شود:

$$C_X = (A^T P A)^{-1} \quad (4-9)$$

وزن مشاهدات برای پیکسل‌ها تابعی از میزان همدوسی اینترفروگرام‌ها، تأثیرات اتمسفری، خطاهای مداری، نویز و... می‌باشد. تصویر همدوسی تعیین‌کننده میزان کیفیت اینترفروگرام‌ها و به‌عنوان تابعی از عوامل مختلف که بر میزان همدوسی تأثیر می‌گذارد، می‌باشد. بنابراین عناصر غیر قطری ماتریس وزن میزان همدوسی اینترفروگرام مربوطه می‌باشد. واریانس فاز اینترفروگرام مطابق رابطه زیر حساب می‌گردد [۲۸]:

$$VAR(\varphi) = \frac{1-\gamma^2}{2\gamma^2} \quad (4-11)$$

که در آن γ میزان همدوسی پیکسل‌های فاز اینترفروگرام است. همچنین RMS اینترفراگرام‌ها در مناطق بدون جابجایی می‌تواند به‌عنوان معیاری برای برآورد دقت مشاهدات در نظر گرفته‌اند و عناصر قطری ماتریس وزن را تشکیل دهد [۲۹]؛ بنابراین وجود شبکه ترازایی و یا ایستگاه‌های دائم GPS می‌تواند حائز اهمیت باشد و می‌توان با استفاده از نقاط دور از منطقه جابجایی و استفاده از داده‌های ژئودتیکی RMS هریک از اینترفروگرام‌ها بدست آورد و به‌عنوان دقت مشاهدات در ماتریس وزن قرارداد.

۴-۲ مطلق‌سازی و صحت سنجی سری زمانی و نقشه سرعت

از آنجایی که در سری زمانی جابجایی به‌دست‌آمده از روش تداخل سنجی راداری، مشاهدات، اختلاف‌فازهای تصاویر در زمانهای اخذ تصاویر هستند و هیچ اطلاعاتی در مورد جابجایی مطلق موجود نمی‌باشد، لذا به‌منظور ارائه نقشه‌های جابجایی و سرعت مطلق، می‌بایست از سایر منابع مشاهدات ژئودتیک مانند تغییر ارتفاعی ایستگاههای ترازایی و یا مشاهدات GPS به‌منظور معرفی منطقه صفر جابجایی استفاده نمود. بدین منظور ضروری است مناطقی که از طرفی در زمینهای پست و هموار و بدون تغییرات ارتفاعی واقع شده‌اند (که خطای باقیمانده اثر توپوگرافی در آنها وجود ندارد) و از طرف دیگر، مشاهدات ترازایی و GPS در آنها نشان‌دهنده جابجایی صفر

می باشد، به عنوان منطقه با جابجایی صفر اعمال شود. همچنین در صورت وجود ایستگاههای تراز یابی و مشاهدات ایستگاههای دایم پایدار 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 دخالت های انسانی مانند استخراج بی رویه آب زیرزمینی، استخراج نفت و گاز، فعالیت های معدنی و یا در اثر پدیده های تکتونیکی می باشد. همچنین از دیگر عوامل کاهش ارتفاعی در مناطق بیابانی فرسایش خاکی می باشد. لذا ضروری می باشد با استفاده از تصاویر اپتیک، اطلاعات نقشه های پوششی کشور و بررسی وضعیت آب زیرزمینی نسبت به علت یابی کاهش ارتفاع منطقه مور مطالعه اقدام گردد.

فصل پنجم

گزارش نهائی و ارائه نتایج

فصل پنجم: گزارش نهایی و ارائه نتایج

ارائه نتایج باید دارای ویژگیهای ذکر شده در این فصل باشد.

۵-۱ گزارش تصاویر راداری استفاده شده در پردازش

این گزارش می بایست موارد ذیل به صورت کامل ارائه شود:

- اسم ماهواره و سنجنده استفاده شده

- شماره و نوع مدار استفاده شده (بالاگذر یا پایین گذر)

- تعداد تصاویر استفاده شده

تعداد تصاویر می بایست 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 به منظور حذف اثر توپوگرافی

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

- روش حذف خطای اتمسفر استفاده شده

به طور کلی، روش های تصحیح خطای اتمسفر را می توان به دو دسته تقسیم کرد: الف) استفاده از ویژگی های

آماری فاز اتمسفر و به کارگیری روشهای محاسباتی همچون میانگین گیری و سری زمانی و پراکنش کننده های

پایدار و ب) استفاده از داده های کمکی (خارجی) مانند اندازه گیری های GPS، مشاهدات چند طیفی، مدل های

هواشناسی محلی و مدل های جوی جهانی. در صورت استفاده از مدل و یا روش محاسباتی، اطلاعات استفاده شده

در این زمینه ذکر شود.

۵-۲ گزارش پردازش تصاویر

اطلاعات پردازش تصاویر می‌بایست شامل موارد ذیل باشد:

- نام نرم‌افزار استفاده‌شده در پردازش تصاویر
- دقت ثبت هندسی تصاویر در نرم‌افزار
- این دقت در تصاویر با فناوری TOPS می‌بایست حداقل ۰,۰۰۱ پیکسل باشد [۳۰]. میزان دقت ثبت هندسی تصاویر می‌بایست ذکر شود.
- روش پردازش تصاویر راداری
- روش پردازش شامل موارد ذیل می‌باشد:
 - تداخل سنجی با خط مبنای کوتاه

در صورت استفاده از این روش به منظور آشکارسازی و حذف بایاس احتمالی در مناطق پوشش گیاهی استفاده از چند اینترفراگرام با خط مبنای زمانی طولانی توصیه می‌شود.
- تداخل سنجی با روش پراکنش‌کننده‌های پایدار
- مدل رقومی استفاده شده تبدیل شده در هندسه مداری
- از آنجایی که در فرآیند حذف اثر توپوگرافی از اینترفراگرامها، مدل رقومی استفاده‌شده با استفاده از هندسه مداری ماهواره به هندسه تصاویر راداری برده می‌شود، ارائه فایل مدل رقومی استفاده شده در هندسه مداری به منظور ارزیابی صحت حذف اثر توپوگرافی از نتایج الزامی است.
- فیلتر اعمال‌شده بر اینترفراگرامها به منظور بهبود کیفیت و مشخصات آن
- ضریب multi-look اعمال‌شده بر تصاویر و پیکسل‌سایز نهایی نتایج
- میزان حداقل همبستگی به منظور انجام عملیات ابهام‌فاز و عملیات زمین مرجع کردن نتایج
- حداقل همبستگی به منظور تدقیق عملیات رفع ابهام فاز می‌بایست ۰,۳ لحاظ شود.

- نام نرم افزار استفاده شده به منظور انجام عملیات ابهام فاز

۵-۳ گزارش نتایج

موارد الزامی در این قسمت به شرح ذیل می باشد:

- نرم افزار مورد استفاده
- نرم افزار استفاده شده برای تمام مراحل کار از پردازش اینترفروگرام های تفاضلی تا آنالیز سری زمانی می بایست ذکر شود.
- تاریخ تصاویر استفاده شده
- جدول خط مبنای مکانی و زمانی تصاویر
- گزارش مطلق سازی نتایج
- گزارش مربوط به منطقه انتخاب شده به عنوان منطقه فاقد جابجایی که با استفاده از سایر مشاهدات ژئودتیک مانند ترازیبی 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 ترازیبی دقیق به تفصیل در این قسمت گزارش می شود.
- صحت سنجی نتایج
- مقایسه میدان جابجایی به دست 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 Z و X
- سری زمانی جابجایی
- ماتریس دقت نتایج
- تفسیر نتایج فرونشست به جهت آشکار سازی 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 به‌صورت 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. Lacznia, (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 EARTH'S 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. <https://doi.org/10.3390/land12071284>
- 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 Differential Radar Interferometry, Journal of Geophysical 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 نقشه برداری 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 Shamschiri, 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, Stanford 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 Rodriguez E, Martin JM. 1992. Theory and design of interferometric synthetic-aperture radars. *Proc. IEEE* 139(2):147-59
- 29 Funning, G.J., Parsons, B., Wright, T.J., Jackson, J.A., Fielding, E.J., 2005. Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery. *J. Geophys. Res.* 110, B09406. <http://dx.doi.org/10.1029/2004JB003338>.

30 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.

نسخه نهایی



**Islamic Republic of Iran
Plan and Budget Organization
National Cartographic Center**

Subsidence map production applying SAR images

Last Edition: 2025-03-30

National Cartographic Center Standard Department
www.ncc.gov.ir <http://standard.ncc.gov.ir>

۲۰۲۵