



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И
КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ

Димитър Петров Минчев

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИ МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА
МОДЕЛИРАНЕ И ОБРАБОТКА НА САТЕЛИТНИ SAR
ИЗОБРАЖЕНИЯ

ДИСЕРТАЦИЯ

за придобиване на образователната и научна степен „доктор“

по специалност „Информатика“

в професионално направление 4.6

Научни ръководители:

проф. д-тн Андон Лазаров, БСУ

доц. д-р Иван Гарванов, УНИ-БИТ

София, 2012 г.

СЪДЪРЖАНИЕ

СЪДЪРЖАНИЕ.....	2
УВОД	5
1. АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА СИСТЕМИТЕ, МЕТОДИТЕ И АЛГОРИТМИТЕ ЗА САТЕЛИТНО ДИСТАНЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗЕМНАТА ПОВЪРХНОСТ	7
1.1. Общ преглед	7
1.2. Предимства и ограничения.....	8
1.3. Техники и методи.....	9
1.4. Алгоритми за моделиране и обработка.....	12
1.5. Определяне на базовите линии	13
1.6. Ко-регистрация на изображения.....	13
1.7. Разстилане на фазата.....	13
1.8. Кохерентност	15
1.9. Обработка на грешки	16
1.10. Приложения	16
1.11. Симулатори	17
1.12. Съвременно състояние на публикациите в областта	19
1.13. Заключение.....	22
1.14. Цел и задачи на настоящата дисертация	22
2. МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСА НА ПОЛУЧАВАНЕ НА КОМПЛЕКСНО SAR ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ЗЕМНАТА ПОВЪРХНОСТ	23
2.1. Геометрично кинематичен сценарий	23
2.2. Математическо моделиране на комплексните SAR сигнали, отразени от наблюдаваната повърхност	25
2.3. Възстановяване на комплексното изображение на повърхността от комплексните SAR сигнали.....	27
2.4. Алгоритъм за моделиране на комплексните SAR сигнали	28
2.5. Алгоритъм за възстановяване на комплексното изображение на повърхността от комплексните SAR сигнали.....	30
2.6. Програмна реализация на алгоритмите за моделиране на комплексните SAR сигнали и възстановяване на комплексното изображение на повърхността.....	31
2.7. Изводи	34
3. МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСА ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА КОМПЛЕКСНА ИНТЕРФЕРОГРАМА.....	35
3.1. Моделиране на процеса на формиране на InSAR сигнал.....	35
3.1.1. Геометрия на InSAR	38
3.1.2. Измерване на движението на терена. Диферентна интерферометрия.....	40
3.1.3. Корегистрация.....	41
3.1.4. Кохерентност.....	45
3.2. Пример на модел на комплексна SAR интерферограма.....	45
3.2.1. SAR геометрично описание	45

3.2.2.	Алгоритъм за възстановяване на образа от комплексно SAR изображение	45
3.2.3.	Изчисляване на кохерентната карта и интерферограма.....	46
3.3.	Квази SAR интерферограми и диферентни интерферограми с ефективна подпикселна крос-корелационна корегистрация на изображенията.....	48
3.3.1.	Моделиране на земна повърхност и последвала деформация на района. Съхраняване на данните в GEO TIFF файлове	48
3.3.2.	Симулация на сателитна интерферометрична система, използваща радио локационна станция със синтезирана апертура.....	49
3.3.3.	Въвеждане на отместване във разстоянията до всеки пиксел на едно от квази SAR изображение	52
3.3.4.	Корегистрация и квази SAR диферентна интерферограма.....	52
3.4.	SAR интерферограми и диферентни интерферограми - числени експерименти	54
3.4.1.	SAR интерферограми и диферентни интерферограми при различни базови линии	54
3.4.2.	Оценка на деформацията на земната повърхност, чрез SAR диферентна интерферограма	66
3.4.3.	Възстановяване на изображението от комплексният сигнал чрез двудименсионно дискретно преобразуване на Фурие	75
3.4.4.	Анализ на различни техники за разстилане на фазата в квази интерферометрични SAR изображения.....	79
3.5.	Изводи	83
4.	НАТУРНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ С РЕАЛНИ САТЕЛИТНИ ИЗОБРАЖЕНИЯ	84
4.1.	Синтез на интерферограма, базирана на цифров модел на релефа от района DILIJAN в Кавказ, Армения.....	84
4.1.1.	Географско описание на изследвания район	84
4.1.2.	Алгоритъм и програмиране	84
4.1.3.	Изводи	86
4.2.	Свлачищни явления в национален парк Севан - Армения.....	86
4.2.1.	Резюме.....	86
4.2.2.	Област на проучването и използвани данни	87
4.2.3.	Свлачищни явления в района на езерото Севан	88
4.2.4.	Експериментални резултати	90
4.2.5.	Изводи	92
4.3.	INSAR изследване на свлачища в района на езерото Севан-Армения	93
4.3.1.	Резюме.....	93
4.3.2.	Геологическо описание на района на езерото Севан	93
4.3.3.	Въведение и цел на изследването.....	93
4.3.4.	Основни интерферометрични характеристики	94
4.3.5.	Описание на данните и инструмента	94
4.3.6.	Прилагане на цифров модел на релефа.....	96
4.3.7.	Резултати от изображенията и интерферометричното изследване.....	97
4.3.8.	Изводи	99

4.4.	Цифрови модели на релефа на рискови територии в Кавказ-Армения	99
4.4.1.	Резюме.....	99
4.4.2.	Въведение	100
4.4.3.	Геоложки характеристики на Армения	100
4.4.4.	Свлачища и наводнения в Армения	100
4.4.5.	Създаване на цифрови модели на релефа за избрани територии в риск ..	103
4.4.6.	Изводи	108
4.5.	Верификация на интерферограми чрез съпоставяне с друг източник	108
4.6.	Изводи	114
5.	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	115
5.1.	Обобщение на съдържанието на дисертационният труд.....	115
5.2.	Публикации свързани с дисертационния труд	116
5.3.	Апробация на резултатите.....	116
5.4.	Основни научно и научно-приложни приноси в дисертационният труд	117
5.4.1.	Научни приноси	117
5.4.2.	Научно-приложни приноси	117
5.4.3.	Бъдещи насоки на научната работа на автора	118
5.5.	Декларация за оригиналност на резултатите.....	118
5.6.	Благодарности.....	118
	ФИГУРИ	119
	ТАБЛИЦИ.....	122
	ЛИТЕРАТУРА.....	123
	ПРИЛОЖЕНИЯ	132
	Приложение 1. Програмен код за генериране на интерферограма	132
	Приложение 2. Програмен код за генериране на диферентна интерферограма	135

УВОД

Актуалност на темата и обзор на резултатите в областта

Развитието на средствата за дистанционни изследвания на земната повърхност през последните години позволи появата и реализацията на нови технологии за обработка на сателитни данни, към които се отнасят радиолокационните системи със синтезирана апертура, монтирани на сателитни носители - мощен инструмент за изследване на земната повърхност, нейната динамика и обекти върху нея. Тяхното приложение е изключително актуална тема, която все по широко се дискутира в научната литература. Този интерес е предизвикан от разнообразните възможности и приложения, които те предоставят. Дистанционното измерване на динамични във времето сигнали и техните параметри, съхранението и обработването им в реално време, възможността за отдалечен мониторинг, са някои от техните възможности. Те намират също така широко приложение в ситуации на кризи, природни бедствия и аварии, като позволяват да се събере и обработи информация от големи територии. Лесната обмяна на данни позволява сътрудничество между отделни колективи при провеждане на съвместни научни изследвания и дистанционните измервания на релефа и динамиката на земната повърхност.

Цел и задачи на дисертационният труд

Цел на настоящия дисертационен труд: на базата на геометрични и кинематични модели на InSAR сценария, да се изградят математически модели на комплексни SAR сигнали, алгоритми за получаване на комплексни интерферограми и диферентни интерферограми, методи и алгоритми за обработка на сателитни SAR изображения и тяхната програмна реализация в среда на MATLAB.

За постигане на посочената цел се поставят следните основни задачи:

- Да се разработи математически модел, алгоритъм и програмна реализация на процеса за формиране на комплексните SAR сигнали;
- Да се разработи математически модел, алгоритъм и програмна реализация на процеса на получаване на комплексно SAR изображение на земната повърхност;
- Да се разработи математически модел, алгоритъм и програмна реализация на процеса за получаване на комплексна интерферограма и диферентна интерферограма;
- Да се извърши числено експериментиране на моделите и алгоритмите при обработка на натурни SAR изображения получени от данните на сателита ENVISAT.

Структура на дисертационният труд

Дисертационният труд включва: съдържание, предговор, четири глави, заключение, научно и научно-приложни приноси, списък на научните публикации, свързани с дисертационният труд, списък с използваните фигури, списък с използваните таблици, списък с използваната литература.

Главите са организирани както следва: глава 1 на тема "Анализ и оценка на системите, методите и алгоритмите за сателитно дистанционно изследване на земната повърхност", глава 2 на тема "Математическо моделиране на процеса на получаване на комплексно SAR изображение на земната повърхност", глава 3 на тема "Математическо моделиране на процеса за получаване на комплексна интерферограма" и глава 4 на тема "Натурни експерименти с реални сателитни изображения".

Основният текст на дисертационния труд е изложен на 141 страници, които включват: 54 формули, 108 фигури и 29 таблици. Фигурите и таблиците са последователно поредно номерирани. Цитирани са 168 литературни източници.

Ключови думи: SAR, InSAR, DInSAR, интерферометрия, диферентна интерферометрия, математическо моделиране и обработка на SAR сигнали, DInSAR оценка на деформациите на земната повърхност.

1. АНАЛИЗ И ОЦЕНКА НА СИСТЕМИТЕ, МЕТОДИТЕ И АЛГОРИТМИТЕ ЗА САТЕЛИТНО ДИСТАНЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗЕМНАТА ПОВЪРХНОСТ

1.1.Общ преглед

Космическите микровълнови радиолокационни системи със синтезирана апертура (*Synthetic Aperture Radar-SAR*) са мощни инструменти за мониторинг на земната повърхност [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]. Тези инструменти сондират земната повърхност и обектите върху нея с високо информативни електромагнитни импулси, регистрират обратното електромагнитно излъчване от повърхността и чрез специални възстановителни алгоритми формират комплексни изображения състоящи се от амплитудна и фазова информация за всеки пиксел от изображението [9]. Получените изображения са дву координатни: разстояние или време на закъснение и азимут или напречно разстояние. Висока резолюция или детайлност (*разделителна способност*) по първата координата се реализира чрез използване на широко спектърни сондиращи сигнали, а по втората чрез кохерентно сумиране на отразените сигнали в процеса на синтеза на апертурата. Приложение на SAR системите в областта на интерферометрията е генериране на тримерни изображения на наблюдаваните обекти, като се използва амплитудна и фазова информация извлечени от комплексните изображения получени от системата [10], [11], [12], [13]. Такова приложение за мониторинг на земната повърхност е предложено в източниците [14], [15], [16], [17].

Първата демонстрация на InSAR техника, приложена за наблюдение на Земята е дело на Graham [18] с помощта на самолетна SAR. Той допълва конвенционална система SAR с допълнителна антена, разположена в равнина, ортогонална на конвенционалната антена, формирайки интерферометрични изображения. По този начин два отразени сигнала от терена се получават едновременно, формирайки амплитудни вариации, които представляват модел на относителните фази на сигналите. И тъй като относителната фаза се променя с промяната на релефа, вариациите на интерферометричните кръгове / *fringes* (*представянето на цялата гама на фазата в интерферограмата от 0 до 2π в пълния и цикъл*) следват топографските контури [19], [20]. InSAR подсистемите са разработени за цифрово записване на комплекса от амплитуда и фаза за всяка антена. По този начин относителната фаза на всяка точка от изображението може да бъде пряко реконструирана. Първите демонстрации на такива системи с въздушна платформа са били докладвани от Zebker, източник [21] и с използване на данни от SeaSAT [19], [22].

Първата оценка за изместване след земетресение е била съобщена в [23], където се комбинира SAR интерферограма с цифров модел на релефа (DEM). Чрез радарни изображения, формирайки интерферограми, получени преди и след земетресението, и премахване на топографските ефекти посредством цифров модел на релефа е открита областта на изместването след земетресението. Чрез комбиниране на три радарни изображения и формиране на два комплекта интерферограми [24] се отделят топографските характеристики и динамичните процеси на релефа, като по този начин се оценяват изместването в дадена сеизмична област. Резултатите се оценяват чрез

сравнение с тези, получени с конвенционални методи, като глобална сателитна система за позициониране (GPS) и триангулационни данни. Подобна схема на интерферометрия с многократно преминаване на сателита и много малка базова линия, която осигурява слаба чувствителност на интерферограмата към релефа, е използвана от Goldstein [25], за да се оцени движението на ледени пластове [26].

1.2. Предимства и ограничения

За разлика от конвенционалните SAR системи, където местоположението на целта е в две измерения (координати), при InSAR координатната система е с три измерения. Освен двете координати, едната по линията на полета (посока азимут), а другата по разстояние от антената до целта (напречно на направлението на движение), третата координата съответства на стойността на фазата на всеки пиксел, което може да се използва за извличане на топографска карта.

Съществено предимство на InSAR пред конвенционалните и GPS геодезическите техники е, че тя дава възможност да се получи своевременна информация за поведението на големи площи от повърхността. Отпада необходимостта от скъпо наземно оборудване или скъпи кампании в непристъпни или отдалечени райони на земната повърхност. InSAR е технология, различна от оптичната интерферометрия. Кохерентният комплексен SAR сигнал съдържа амплитуда и фаза. Неговият микровълнов характер позволява той да прониква през облачна покривка и използва денонощно оперативните си способности. InSAR технологията осигурява високоскоростен достъп до данни и тяхната обработка посредством софтуер, изгражда архив от данни, който дава възможност за продължително наблюдение на области от земната повърхност.

Едно от ограниченията е времевата декорелация в резултат на изменение на спектъра и топлинните характеристики на земната повърхност между получаването на две изображения. Голи скали и изкуствени съоръжения често остават кохерентни за дълъг период от време, но в С-честотен диапазон (*дължина на вълната от 5,6 см*) интерферограми от горски местности, например могат да бъдат некохерентни, дори и изображенията да са били получени с един ден разлика. Това се дължи на многократно разсейване от листа и малки клони, чиито позиции са нестабилни. Използването на снимки, предоставени от радарни сигнали използващи L-честотен диапазон, осигурява съгласуваност дори и в райони с растителност [27].

Друго ограничение за InSAR технологията е променящата се атмосфера на Земята: например концентрации на водни пари, нарушават участника фаза, водещо до фазови измествания, които могат да симулират деформация на земната повърхност. Облаците могат да предизвикат промени във фазите, еквивалентни на земни измествания до 10 сантиметра. InSAR може да измерва само повърхностна деформация в пряка видимост (LOS) на спътника, така че с изместване, успоредно на посоката на сателита води до получаване на информация само по едно измерение. Това може да доведе до неясноти в разчитането на интерферограмата, което се преодолява чрез комбинации от данни, получени при различни ъгли на наблюдение [28], [27].

Винаги съществува вероятност за загуба на корелация на базовата линия за някои от двойките изображения. Критичната стойност за перпендикулярната базова линия за двойка изображения определя границата, след която има загуба на кохерентност.

1.3.Техники и методи

Една от техниките на обработка се нарича интерферометрия, базирана на едно преминаване на сателита. Това е конфигурация с две антени. В този случай, наречен още странична интерферометрия (*cross-track interferometry*), две антени са монтирани на една и съща платформа. Едната конвенционална SAR антена излъчва микровълнови сигнали и получава отразени сигнали, докато допълнителната антена намираща се на фиксирано разстояние само получава отразени сигнали. Двете антени са подредени по такъв начин, че тяхната базова линия е перпендикулярна на посоката на полета. Заедно с координатите по посока и по напречно направление, фазовата разлика осигурява дефиницията на три дименсионното разположение на всички точки от изображението [19]. Две антени са често използвани при мисии, като NASA TOPSAR [28]. Получените цифрови модели на релефа (*Digital Elevation Models*) представляват регулярна решетка на топографията на района. Такива цифрови модели на релефа са генерирани от космическата система SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), която бе стартирана в 2000 година. Това беше съвместен проект на NGA и NASA с участието на DLR и ASI. Тя бе посветена на изготвянето на прецизен глобален топографски модел на Земята повърхност. За единадесет дневната мисия, цифров модел на релефа в 1-arc second (резолюция от 30m x 30m) бе изготвен, използвайки техниката на интерферометрия базирана на едно преминаване с фиксирана базова линия в С и Х-честотен диапазон, като С-честотен диапазон бе използван за генериране на продължително картографиране, а Х- честотен диапазон за обработка и контрол на качеството [29]. Фиксирането на базовата линия бе постигнато с две антени, едната на борда на соваката, и другата намираща се на разстояние 60 метра. Наклонът на орбитата на соваката е бил 57 градуса, което позволи модела да бъде създаден между 60° северна и 56° източна ширина, което покрива 80% от Земята повърхност. Абсолютната линейна вертикална точност на височинните данни е 16 метра, а абсолютната хоризонтална точност е 20 метра. SRTM данните бяха обработени от JPL в цифров модел на релефа с географска проекция (*latitude/longitude*) съотносно WGS84 по хоризонтала и EGM96 по вертикала с 90 метра осредняване спрямо 30 метровите данни.

Втората техника на обработка се нарича интерферометрия базирана на две преминавания. Това е конфигурация с една антена. Други космически системи разчитат на една единствена антена, но работят при условие на повтораемост на орбитата, такава че космическият апарат да следва максимално първоначалната орбита за да изготви второ SAR изображение, необходимо за интерферометрия [28]. Тази конфигурация се нарича интерферометрия с повтораемост на орбитата или интерферометрия, базирана на две преминавания. Тя се осигурява чрез контролиране на траекторията на сателита по такъв начин, че да се повтори пътеката му почти перфектно. Това дава възможност за генериране на топография и за откриване на

движения по повърхността. Ако има разделение по траектория между повтарящите се преминавания и няма промени на повърхността, то тази двойка изображения, получени в два различни момента, може да се използва за интерферометрични топографски измервания [19]. С изстрелването на космическия апарат ERS-2 през 1995 година заедно с ERS-1, Европейската агенция за космически изследвания [30] осигури две сателитни системи с времева разлика от един ден. Двата сателита в така наречената „ТАНДЕМ“ мисия се следваха един друг по една и съща орбита, така че една и съща зона е наблюдавана и топографски карти могат да бъдат генерирани. TanDEM-X заедно с TerraSAR-X (*изстреляни през 2007*) е формация от два сателита, носещи X-честотен диапазон радар, които летят на разстояние само няколко стотин метра, така че синхронни записи наречени „БЛИЗНАЦИ“ се генерират в така наречения режим „Strip Map Mode“ (*3 m земна резолюция*) това е база за глобален цифров модел на релефа [31]. Хомогенен височинен модел на цялата земна повърхност ще бъде завършен през 2014 година. Той ще има относителна вертикална точност от 2 метра и 10 метра абсолютна, с хоризонтален растер от приблизително 12x12 квадратни метра, силно зависимо от географските координати. Системата се поддържа от Германския аерокосмически център - The German Aerospace Centre (DLR) и Австрия.

Първи метод на обработка е методът на двете преминавания, наричан още елиминация чрез цифров модел на релефа. В този случай за премахване на ефекта на топографията се изисква наличието на цифров модел на релефа - DEM. От две изображения се получава интерферограма, а от цифровия модел на релефа симулирана интерферограма (*наричана още синтезирана интерферограма*) със същата геометрия като реалната. Необходимо е да е известна прецизна позиция на сателитите. За тази цел се използва информация за орбиталните вектори. Фазата в симулираната интерферограма зависи само от топографията, за разлика от фазата в реалната интерферограма, която се влияе и от изместването [32]. Следователно чрез изваждане на фазите от двете интерферограми, се премахва влиянието на топографията, или казано по друг начин интерферометричните кръгове (*fringes*) свързани с общата топография се изваждат. Резултатната интерферограма (*така наречена „диферентна интерферограма“*) съдържа само тези интерферометричните кръгове представляващи разликата в изместването. Това е най-предпочитаният метод за изчисление на „диферентна интерферограма“, защото е най-директен.

Втори метод на обработка е методът на три преминавания (т.е. двойна-диференция). За този метод са необходими три SAR изображения, като едно от тях е главно за две от интерферометричните двойки. Получават се две реални интерферограми върху една и съща геометрия, но с различни базови линии. В резултат двете от интерферограмите ще имат различни интерферометрични кръгове, което изисква корегистрация. Една от двойките трябва да обхваща периода на деформация, а другата двойка трябва да бъде не засегната от това явление.

Трети метод на обработката е така нареченият метод на четири преминавания. Методът е аналогичен на метода на три преминавания. Използват се четири изображения и се формират две реални интерферограми, за които се прилага

корегистрация. Това свежда метода до този с три преминавания и отстранява времевата декорелация между изображенията. Този факт позволява по-голяма гъвкавост при избора на изображенията.

Техника за картографиране на деформации. За изследване на движението на повърхността се използва техниката интерферометрия по направление на посоката (*along-track interferometry*). Чрез този метод повърхността се заснема няколко пъти с времева разлика от секунда до години [19]. Това може да бъде постигнато или с две антени поставени на космически апарат, паралелни на посоката на движение или чрез изображения направени в различен времеви интервал, но по същия летателен път и наблюдавана геометрия (релеф). Ако антените са разположени напречно на траекторията на сателита ще се появи влияние на топографията на релефа. В противен случай може да бъде засечено само изменение на повърхността. Сеизмичните приложения на InSAR включват изследване на земетресения, свличания и тектоника на земните пластове. Използването на две изображения за формиране на интерферограма предоставя като резултат възможността за измерване на сеизмични, ко-сеизмични и пост сеизмични деформации. Тези условия се дефинират като: деформации, предшестващи сеизмични събития (*необходими са две изображения преди събитието*), обхващащи сеизмичното събитие (*необходимо е едно изображение преди и едно изображение след събитието*), или след сеизмично събитие (*необходими са две изображения след събитието*) [33]. Аналогична е ситуацията при мониторинг на деформации, породени от вулканична дейност. Могат да бъдат извършени измервания: преди, по-време на и след вулканично изригване. Вулканични изригвания, влияния на вулканите като нови запълвания с магма, заровени магма зали и дори термални контракции от изригнали потоци лава могат да бъдат засечени чрез InSAR [27]. Земни свличания, породени от минна дейност, водни сондирания и нефтени разливи, също могат да бъдат дистанционно измервани посредством InSAR. Техниката се прилага също в разследвания на свлачища и ледени потоци (*движение на ледници*).

Техника на тематично картографиране. Промяна в отразителните характеристики на земната повърхност между получаването на две изображения може да доведе в промяна на кохерентността. Важен момент е определянето на геометричната декорелация, причинена от характеристиките на базовата линия от времевата декорелация, за да се извърши коректна интерпретация на физичния феномен [33]. Тази възможност на системата може да бъде използвана за изучаване на измененията на горите, растеж на растителността, класификация на земи, мониторинг на наводнения, хидрология, изменения в солеността и др.

Техника по картографиране на атмосферното закъснение. В районите където топографията е много добре известна и няма условия за деформация на повърхността, чувствителността на радарните сигнали към вариацията на отразителната способност на атмосферата могат да бъдат изучавани от метеорологическа гледна точка, така наречената *Interferometric Radar Meteorology (IRM)*, за създаване на карти с висока резолюция на водното съдържание в атмосферата [33].

Диферентната SAR интерферометрия е базова InSAR техниката за изследване на геодинамика. Влиянието на топографията се премахва чрез оценка на три и повече SLC SAR изображения на повърхността. Те са получени през времеви интервали от порядъка от секунди до години, включващи събитието на изместване на повърхността. Извършва се сравнение между интерферограма, представяща топографския релеф преди геологичното събитие и интерферограма, представяща топографията след геологичното събитие. Изместването на повърхността се открива във фазовата разлика на пикселите от всяка двойка от множеството SAR изображения [34]. Фактът, че изместването може да се измерва в границите на един пиксел е съществено отличие от други техники, при които движението може да бъде измерено само когато то е повече от значителна част от резолюцията на изображенията.

При формирането на SAR изображение, данните от измерванията (*raw data*) се трансформират в единично комплексно изображение (*Single-Look Complex - SLC*), което представлява дву-дименсионна матрица с координати по колони - координатите по наклонено разстояние (*slant range*) и по редове – координатите по азимут (*azimuth / cross range*), като всеки елемент на матрицата е елементарен картинен елемент, наречен пиксел, или „разделителен елемент“ (*resolution cell*) асоцииран с малък район от наблюдаваната земна повърхност. Всеки елемент от матрицата е комплексно число, което носи информация за амплитуда и фаза на микровълновия сигнал, отразен от съответния разделителен елемент на повърхността [35].

1.4. Алгоритми за моделиране и обработка

Съвременни модели, методи и алгоритми за SAR интерферометрична обработка с висока точност на глобално топографско картографиране и Монте Карло симулация на реална InSAR система, са представени в [36]. Разработен е нов алгоритъм от четвърти ред за оценка на относително изместване на сателит-зема при SAR обработка, който включва двуменсионна трансферна функция и фазова корекция по разстояние, при обработката на множество азимутни линии [37]. Предложен е К-осредняващ алгоритъм за групиране и контролирани йерархични Бейс мрежи за клъстеризация на огромни масиви от данни, получени от *Shuttle Radar Topography Mission* [38]. Производствената линия за цифровия модел на релефа от *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), която е включва сканиране и визуализиране, SAR и интерферометрична обработка и накрая мозаична процедура, е представена в [39]. Използването на специфична техника на моментно преобразование на Фурие при SAR обработка, която използва прозоречна функция, е разгледана в [40]. Системи по направление на полета на самолетни носители са представени в [41]. Експеримент на космическа InSAR система, оперираща по посока на движението и анализ на ефективността и сценарии за мисии са представени в [42]. За изследване на сеизмични и вулканични процеси, както и за картографиране на ледници и техните движения във важни за околната среда полярни региони с цел диагностика, с многократни преминавания на сателита [43]. Симулирани интерферограми и тяхното сравнение с реални SAR данни е представено в [44]. Автоматизация на процеса на реконструкция на цифрови модел на релефа от ERS тандем двойки, както и нов алгоритъм за разстилане на фазата са предложени в [45].

Адаптивен филтър на Голдщайн за подобряване на качеството на решение на стерео InSAR проблем при геолокация и генериране на цифрови модели на релефа в избрана картографска проекция е публикувано в [46]. Просто и точно решение на интерферометричния стерео SAR проблем при геолокация и ефективно генериране на цифрови модели на релефа в избрана картографска проекция е публикувано в [47]. Изследване на диферентна InSAR техника, алгоритми за обработка и математическа формула на нов метод за диферентна интерферометрия „на 4 паса“ заедно с неговата математическа формула е представено в [48].

1.5. Определяне на базовите линии

Нов подход към акуратна оценка на базовата линия, който се основава на Калман филтър и използва корегистрационни параметри на интерферометричните SAR изображения е предложен в [49]. Анализ на влиянието на базовата линия при диферентна InSAR за откриване на изместване с точност по-малко от 1 cm е публикуван в [50]. Изчисляване на интерферограма с оценка на влиянието на базовата линия върху оплоскостяване на фазата, адаптивно филтриране и разстилане на фазата за получаване на височинен модел на релефа е предложено в [51]. В [52] е предложен динамичен програмен подход при оценка на релефа чрез множество от InSAR базови линии.

1.6. Ко-регистрация на изображения

Основна операция при интерферометричната обработка е съвместната регистрация (*корегистрация*) на двете комплексни изображения - главно и подчинено, която се извършва в две стъпки: груба корегистрация (*coarse coregistration*) - съвпадение на изображенията на ниво пиксел, фина корегистрация (*fine coregistration*) - под пикселно съвпадение на изображенията. Посредством комплексно умножение на корегистрираните изображения се генерира интерферограма. Амплитудната стойност е осреднена амплитуда за пиксел, а фазата е разлика между фазите на двете изображения за всяка точка от интерферограмата.

Регистрация на множество InSAR изображения на един и същи терен, получени при многократни облитания на повърхността от сателит чрез прилагане на корелация е предложено в [53]. Методи за фина регистрация на InSAR изображения с откриване на специфични характеристики на повърхността в тях се анализират в [54]. Гео-кодиране и корегистрация на SAR изображения чрез прилагане на адаптивен алгоритъм се разглежда в [55]. Паралелен алгоритъм с използването на MPI библиотека и реализацията на модул за съвместна корегистрация на SAR изображения е предложен в [56].

1.7. Разстилане на фазата

InSAR използва амплитудната и фазова информация на две комплексни изображения на дадена област от земната повърхност, получени чрез две различни антени или чрез двукратно преминаване на един SAR сателит. Фазовата разлика между всяка двойка пиксели на двете комплексни изображения създава интерферограма. При наличие на разлика във фазите на две комплексни изображения, получени една

позиция или много близки две позиции (с минимална базова линия), в интерферограмата могат да се открият измествания на повърхността до части от дължината на вълната на облъчващия сигнал [33], [28], [25].

Влиянието на кривината на Земята върху фазата се коригира чрез процедурата „оплоскостяване“ (*flattening*) чрез използване на информация за орбитата и кохерентността, корелацията на отразените сигнали, която зависи от позициите на сателитите в момента на двете измервания [57], промяната на физичните характеристики на релефа във времеви интервал между двете изображения (времева декорелация, причинена от промени в растителността или водната повърхност, и др.) и времевите закъснения на вълните, причинена от промяна в тропосферните или йоносферните условия между две прелитания [58]. Други източници на декорелация могат да бъдат лошото качество на използвания цифров модел на релефа или броя на свързващите точки и пространственото разпределение при корегистрацията на изображенията. Прилага се предварително филтриране при формирането на интерферограма [22], осредняване на броя на резолюционните елементи в специфичен прозорец, за да се подобри фазовата статистика [33]. Той се прилага при съотношение разстояние-азимут, като 1:5, 2:10 и т.н., което дава приблизително квадратни пиксели. Разработени са няколко филтриращи алгоритми за повишаване на качеството на резултатния интерферометричен модел. Един от тях е адаптивен филтър, предложен от Goldstein [59], който значително подобрява качеството на интерферометричните кръгове и намалява шума, използвайки силата на спектъра на интерферометричните кръгове, за да се осъществи изглаждане на спектъра на интерферограмата. Правилното цяло число от фазови цикли е необходимо да бъде добавено към измерването на фазата, за да се получи правилната дистанция по наклонено разстояние, тъй като промяната на повърхността се измерва като част от фазовия цикъл. За тази цел абсолютната фаза, която е била сгъната в интервала $(-\pi, +\pi)$ се реконструира чрез разгъване на фазата. Процедурата е чувствителна към геометрията на сателита, тя изисква къси базови линии. Резултатната разгъната фаза се трансформира от радарна координатна система (*разстояние/азимут/височина*) до конвенционална геодезична система, като WGS84 (*географска ширина / географска дължина / височина над референтният елипсоид*) посредством процедура на геокодиране, използвайки позициите от цифровия модел на релефа или финна настройка на базовата линия и на геометрията на изобразяване в случай, когато се използва разгъната топографска фаза. Като краен резултат може да се построи карта на изместване на повърхността с резолюция десетки метри и под сантиметрова точност. Тъй като радарът е способен а измерва разлика в дължина на пътя само по „линията на визиране“ (LOS) или по посока на наклоненото разстояние, интерферограмата от деформациите на повърхността се обуславя от изместванията по LOS [33].

Предложено е решение на проблема по интерферометричното възстановяване на изображението, като двуменсионна абсолютна оценка на фазата, което съчетава итерационен алгоритъм с нелинейна стохастична оценка на фазата [60]. Представен е анализ на производителността на полиномиален алгоритъм за двуменсионно

разстилане на фазата, формулирани са изрази за средната квадратична грешка на изчислените коефициенти. Извършени са Монте Карло симулации на избрани примери за потвърждаване на теоретичните резултати [61]. Сравнени са различните методи за преобразуване на фаза във височина при SAR интерферометрия, използващи както синтетизирани така и реални данни [62]. Теоретичен анализ на алгоритми за разстилане на фазата за SAR интерферометрия, реализирани и демонстриране на тяхната теоретичната равностойност е публикуван в [63]. Решение за интерферометрично разстилане на фазата чрез максимална ентропия е публикувано в [64]. Представен е параметричен модел и алгоритъм за оценяване на параметри на функции за разстилане на двуменционна фаза, като фазата на всеки дискрет на наблюдаваното поле се разстила, като се увеличава/намалява с число кратно на 2π , което е най-близко до разликата между принципната стойността на фазата и прогнозната стойност фазата в тези координати, публикувано в [65]. Предложен е мулти резолюционен подход за подобряване на разстилането на фазата, методът е изследван чрез симулации. Резултатите показват, успешно разстилане на фазата без независимо от наклона на релефа и при ниска кохерентност [66]. Разстилане на фазата чрез на разрези на клонове и рекурсивен метод на свързани, посредством добавяне на две нови функции към класическия подход на Голдщайн [67]. Двуменционен метода на най-малките квадрати за разстилане на фазата при интерферометрична SAR обработка е предложен в [68]. Сравнение на различни техники за разстилане на фазата, базирани на най-малката средна квадратична грешка е предложена в [69]. Бейс подходът за SAR интерферометрично възстановяване на фазата и предложените симулации показват положителни резултати при възстановените фазите при ниски стойности на кохерентност [70]. Нов метод на интерферометрично възстановяване на SAR изображението, използвайки метода Монте Карло, реализиран като невронна мрежа със стойности в комплексната област е демонстриран при разстилане на фазата на изображение, публикувано в [71]. Нов метод за определяне на нееднозначностите във фазата от мулти честотна интерферометрична система (дву-честотна интерферометрия), чрез умножаване на сигнали с различна честота е предложен в [72]. Резултати от компютърно моделиране и сравнителен анализ на два подхода за разстилане на фазата: чрез методите на остатъците и най-малките квадрати, реконструкция на фазата и оценка на нивото на шума при разстилане са публикувани в [73].

1.8.Кохерентност

Оценка на кохерентността за SAR изображения, като точността на получената оценка за величината на кохерентност, е функция на средния броя на пикселите и броя на независимите дискрети от всеки пиксел (*т.е. резолюция на кохерентната карта*). Средната (*комплексна*) кохерентност позволява оценка на кохерентност при локално стационарни сигнали при влошена клетъчна резолюция [74]. Нов подход за оценка на InSAR кохерентност, основан на бинарни кохерентни изображения, който се използва за оценка на шум в SAR интерферограмите, е публикуван в [75].

1.9. Обработка на грешки

Метод за компенсиране на грешките, индуцирани от движението на авиационна SAR чрез двуканална фазова компенсация, е представен [76]. Анализ на атмосферно индуцирани грешки върху интерферометричния цифров модел на релефа и оценка на влиянието на базовата линия върху тяхното минимизиране са представени в [77]. Метод за многократно намаляване на нивото на шума в интерферометричния SAR образ е публикуван в [78]. Предложен е анализ на фазовите грешки при интерферометрични SAR системи с едно облитане, получените резултати са приложени в практически пример [79].

1.10. Приложения

След мисията SeaSAT през 1978 г. са осъществени няколко мисии на космическите совалки (*Space Shuttle*) на САЩ с радиолокационни системи със синтезирана апертура на борда. Проведени са множество сателитните SAR мисии [80] в това число: ERS-1 на ESA [30], изстрелян през 1991 с носеща честота 5.3 GHz (*C-честотен диапазон*); ERS2 (*нак на ESA*) изстрелян през 1995 с носеща честота 5.3 GHz (*C- честотен диапазон*); SRTM на NASA изстрелян през 2000 с честота 5.3 GHz (*C- честотен диапазон*); ENVISAT на ESA [30], изстрелян през 2001 носеща честота 5.3 GHz (*C- честотен диапазон*); ALOS на JAXA [81], изстрелян през 2006 носеща честота 1.2 GHz (*L-честотен диапазон*) и много други. На 14 април 2012 година ENVISAT спря да предава данни към Земята. ESA планира нови пускове на радиолокационни системи със синтезирана апертура в бъдещите мисии Sentinel.

За оценка на изчислителната производителност на борда при SRTM мисия, се предлага InSAR процесор със средна резолюция, работещ почти в реално време [82]. Германският център за дистанционно наблюдение на Земята, реализира операционна система за интерферометрична SAR обработка, поддържащата системите: ERS SAR, ENVISAT ASAR, както и мисията SRTM, като основна цел е интерферометрична обработка и цифров модел на релефа, и попълване на глобална база данни [83]. Бъдещи космически SAR мисии на НАСА: *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) и *LightSAR*, както и детайлно описание на използваните технологии и инструменти са публикувани в [84]. SAR съоръжението в Аляска (*Alaska SAR Facility / ASF*) е разпределен активен архивен център на НАСА, то осигурява SAR данни, продукти и системи [85]. Представен е Бейс подход за топографско картографиране чрез SAR интерферометрия с няколко антени, топографската реконструкция е формулирана като параметрична оценка, разработен е InSAR симулатор за оценка на предложените топографски алгоритми за реконструкция [86]. Представено е приложение на DInSAR техника и нов метод за оценка на стабилността на свлачищни райони, който дава достоверни резултати в зони с ниско ниво на урбанизация, като например свлачищно опасните райони в Южна Италия [87]. Представени са основните характеристики на инструмента ASAR от сателита ENVISAT на ESA, обоснован е изборът на алгоритъм за обработка за всеки продукт на базата на изискванията за качество на изображението и производителност спрямо спецификациите на ESA [88]. Информация за състоянието на инструмента ASAR на ENVISAT, завършените етапи на проекта, заедно с

предварителна информация за производителност му, е публикувана в [89]. Откриване на земни свлачища в източната част на префектура Сайтама, която се намира на север от столицата на Япония – Токио и извличане на интерферометрични кръгове, чрез ERS/SAR двойки данни с дълъг интервал, е представено в [90]. Предложена е ранна предупредителна система за мониторинг, тъй като геометрията на свлачището, като дълбочина и засегнат обем, както и поведението ѝ, като типология и кинематични характеристики, може да бъде точно предсказано въз основа на точни геоложки и геотехнически характеристики на почвите, и чрез прилагането на специфични математически модели [91]. Предложен е нов алгоритъм за мониторинг на локализиранни явления на деформации, въз основа на малки базови линии при диферентни SAR интерферограми, по-специално предложеният подход разширява възможностите на техниката SBAS, представеният алгоритъм е тестван с данни, получени от сателита ERS от областта Кампания в Италия [92]. Пред-проектно проучване и симулация на малка сателитна радиолокационна система със синтезирана апертура за глобално 3D изобразяване, чрез три абсолютно еднакви малки спътника, като два от тях летят заедно по успоредни орбити с различни ъгли на наблюдаване на една и съща област и позволяват интерферометрия без времева декорелация, а третият лети по друга орбита точно зад двата спътника с различно ъгловото разделяне, и облита същият район с кратко време на повторно наблюдение, е публикувано в [93]. Бъдещето на инструментната технология за космическо дистанционно наблюдение на Земята на НАСА за следващите 25 години е публикувано в [94]. Доклад за напредъка на NASA и JPL при въздушните радиолокационни системи със синтезирана апертура, техниките за поляриметричната интерферометрия по посока на движението и по напречно направление, развити с помощта на AIRSAR, е публикуван в [95]. Методика за откриване на големи геометрични структури и тяхното картографиране, чрез InSAR измервания, е публикувано в [96]. Системни изисквания и архитектура на бъдеща глобална система за наблюдение на Земята, пространствено-времевата резолюция, архитектурни решения, еволюция и сензорен уеб базиран подход, са представени в [97]. Техника на постоянно точкови излъчватели насочена към съвместно използване на серия от космически интерферограми на SAR изображения с цел извличане на висока точност за височините и деформациите на земната повърхност, чрез рядка мрежа на радарни точки – постоянни излъчватели, е публикувана в [98].

1.11. Симулатори

В интерферометричната SAR обработка, симулацията на интерферограмите е част от процеса на обработка и генерация на комплексни образи. Тя се използва като синтезирани данни, за да се тества и докаже цялата верига на процеса на InSAR обработката от създаването на интерферограмата до реконструкцията на цифровия модел на релефа - DEM. Симулацията на SAR включва симулиране на релефа и на интерферограми с цифрови методи и параметри на орбитата на сателита.

Предизвикателство представлява изследването на комплексните SAR сигнали с математическото моделиране на наблюдавания от системата релеф. Съществуват различни интерпретации на този проблем. Симулационен модел на повърхностна

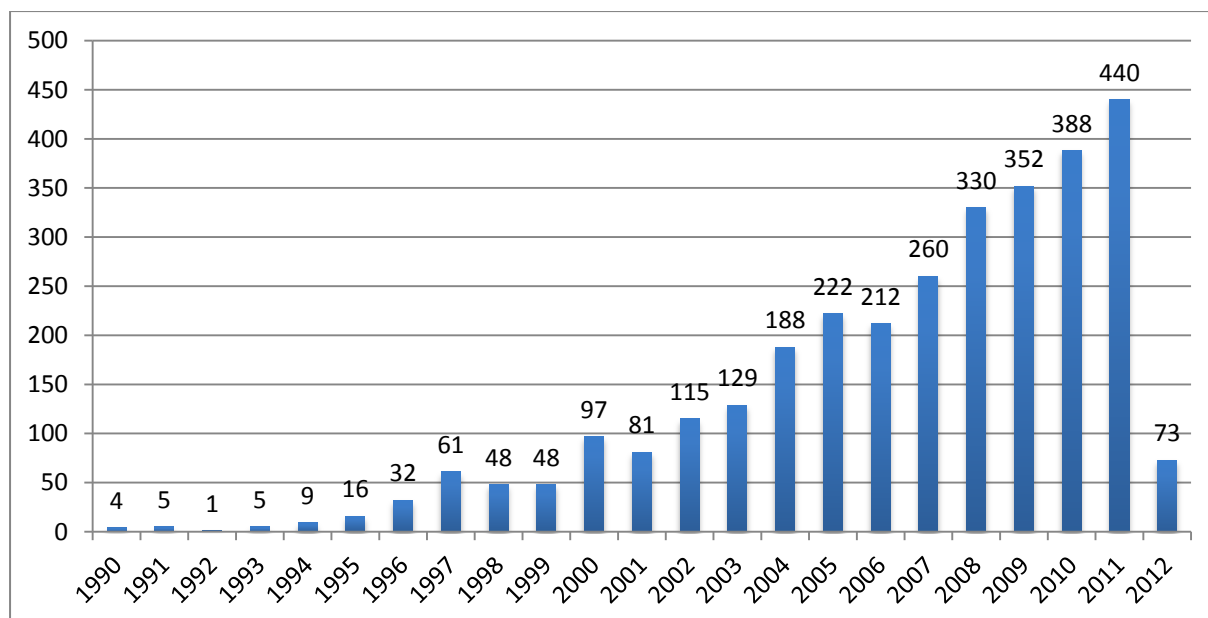
топография, базиран на фрактално брауново движение е представен в [99]. За моделиране на интензивността на елементите върху земната повърхност се прилага косинусова функция в [100] и [101].

Изградена е станция обработка на космически InSAR данни, генерирани с повторемост на орбитата, осигуряващи научни изследвания [102]. Разработен е интерферометричен симулатор за тестване и оптимизиране на InSAR алгоритми за обработка, с негова помощ грешки, породени при интерферометричните алгоритми за обработка, могат да бъдат изолирани и количествено определени [103]. Представен е статистически оптимален симулационен процесор за три-дименсионно картографиране на базата на три SAR антени, за да се намалят недостатъците: неяснота във фазата и шум в данните при конвенционална SAR интерферометрия [104]. Интерферометричен SAR процесор за избягване на фазови нееднозначности е публикуван в [105]. Разработена е модулна интерферометрична система за генериране на интерферометрични SAR продукти, която играе ролята на мост за устойчиви оперативни висококачествени системи за генериране на континентални цифрови модели на релефа [106]. Интегриран AIRSAR/TOPSAR мулти честотно поляриметричен интерферометричен SAR процесор, който извлича максималното съдържание на информация от SAR данните, чрез комбинирана поляриметрична (C-, L- и P- честотен диапазон) и интерферометрична (C-и/или L- честотен диапазон) техники е описан в [107]. SAR интерферометричен и диферентно интерферометричен процесор за обработка с основни модули: Modular SAR Processor (MSP), *Interferometric SAR Processor* (ISP), Differential Interferometry and Geocoding Module (DIFF&GEO), е предложен в [108]. Представен е ефективен SAR симулатор на комплексни сигнали за интерферометрични двойки, като интерферограми получени от симулирани данни са сравнени с тези, получени от реални данни [109]. Генериране на SAR интерферограми с машина с разпределена памет и паралелна обработка на информацията чрез 16 Power-PC платформи и обработващи в реално време големи транслационни отмествания, между интерферометричните двойки изображения е представено в [110]. Ако броят на пикселите в изображението е достатъчно голям, изпълнението постига почти линейна скорост с добавяне на процесори. Разработен е цифров симулатор за оптимизиране на три антенна InSAR система за топографско картографиране, в симулатора е включена процедура за разстилане на фазата, получени са висококачествени карти на височината на терена [111]. Реализиран е InSAR симулатор на комплексни сигнали, използван е един и същ космически SAR при слабо различаващи се позиции с цел анализ на интерферометричната геометрия, подобряване на радиометричната и геометричната калибрация и цифровите модели на релеф [112]. Нов метод за извличане на линейни декорелационни характеристики в SAR интерферометричните изображения, чрез сливане на информация за амплитудата и кохерентност, е представен в [113]. SLC сигнал симулатор за интерферометрична SAR система на космическа платформа движеща се по идеална Кеплерова орбита е описан в [114], като за системна платформа се моделират механични деформации на референтните структури. Концепция, проектиране и реализация на "InSAR SIM", среда за симулация и оценка на сателитни InSAR данни от тандем мисия RADARSAT-2 на Канадската космическа агенция са

представени [115]. Ефективна геолокация и симулация на изображение при дълга SAR картова ивица е представена в [116], като за позиции, разположени нарядко по протежение на дълъг откос, се използва обратно геокодиране за изчисляване на координатите на картата. Представен е нов алгоритъм за ефективна симулация на SAR интерферограми на големи площи и пресечен терен, като симулираните резултати се сравняват с реални данни от тандем мисията на спътника (ERS-1/2) и *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) [117]. Симулация на интерферограмно изображение от космически SAR системи с реални параметри на данните, сензора и орбитите е представена в [118]. Формиране на двойка изображения при кохерентна радиолокационна система със синтезирана апертура, посредством нов подход за формиране на образа, който едновременно формира, фокусира и интерферира двете изображения е представено в [119], при това не е необходимо корегистриране на изображението, а проблемите по разстилане на фазата и атмосферните ефекти в нея са избегнати. Посредством стохастично моделиране на времеви серии при SAR интерферометрия в [120] е представен адаптивен модел за тестване на формално разпространяване на грешката. Програмна среда за обработка на данни от дистанционно наблюдение на земната повърхност е предложена в [121]. SAR интерферометрични оптимални алгоритми за обработка при Гаусови стохастични нестационарни във времето модели на повърхността са публикувани в [122].

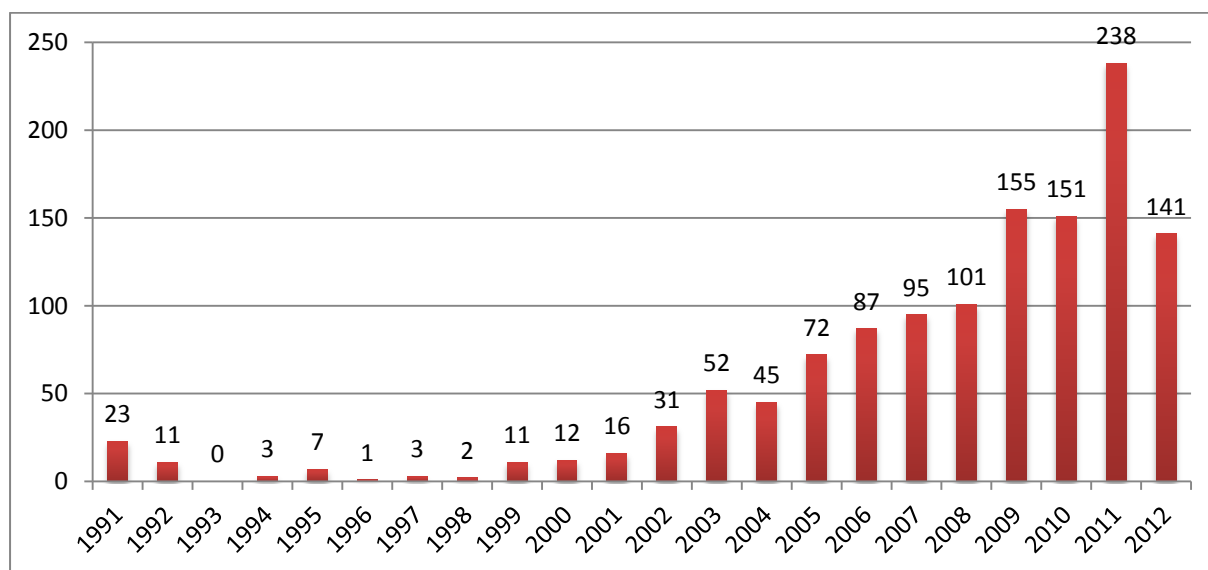
1.12. Съвременно състояние на публикациите в областта

На Фиг.1 са представени броя на публикациите по години в областта на InSAR от виртуалната библиотека Scopus за периода 1990 до първо тримесечие на 2012 включително. Графиката представя общо 3116 на брой публикации.



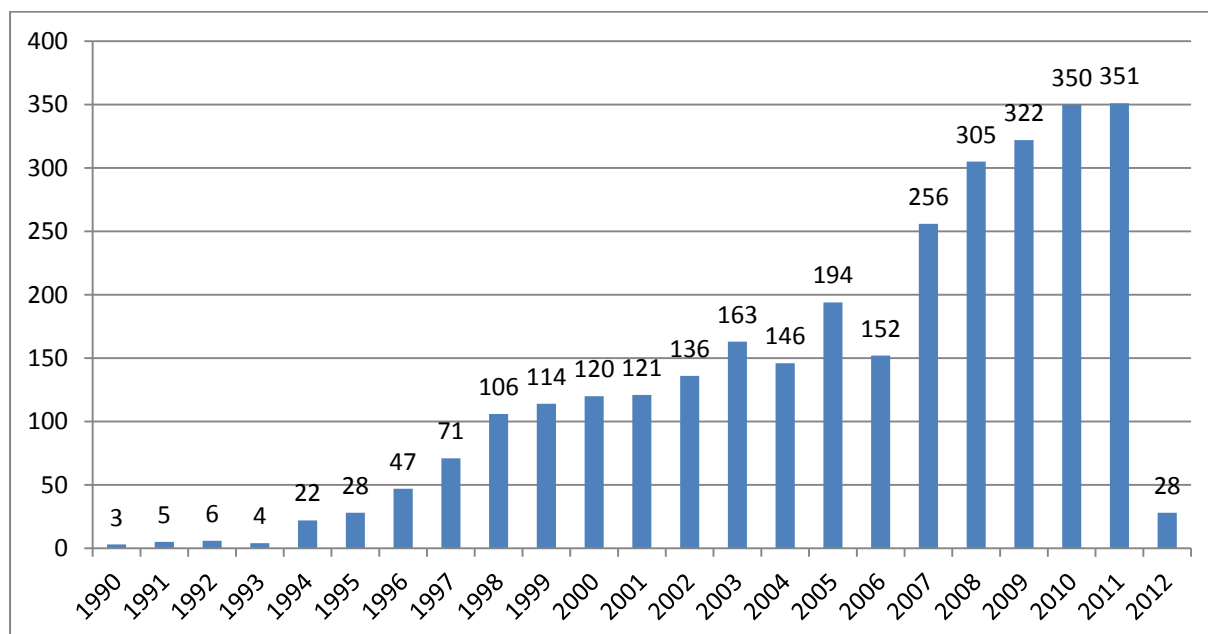
Фиг. 1. Scopus, Keyword: InSAR, Results: 3116, Period: 1990-2012

На Фиг. 2 са представени броя на публикациите по години в областта на InSAR от виртуалната библиотека ScienceDirect за периода 1991 до първо тримесечие на 2012 включително. Графиката представя общо 1257 на брой публикации.



Фиг. 2. ScienceDirect, Keyword: InSAR, Results: 1257, Period: 1991-2012

На Фиг.3 са представени броя на публикациите по години в областта на InSAR от виртуалната библиотека IEEE Xplore® Digital Library за периода 1990 до първо тримесечие на 2012 включително. Графиката представя общо 3050 на брой публикации.



Фиг. 3. IEEE Xplore® Digital Library, KeyWord: InSAR, Results: 3050, Period: 1990-2012

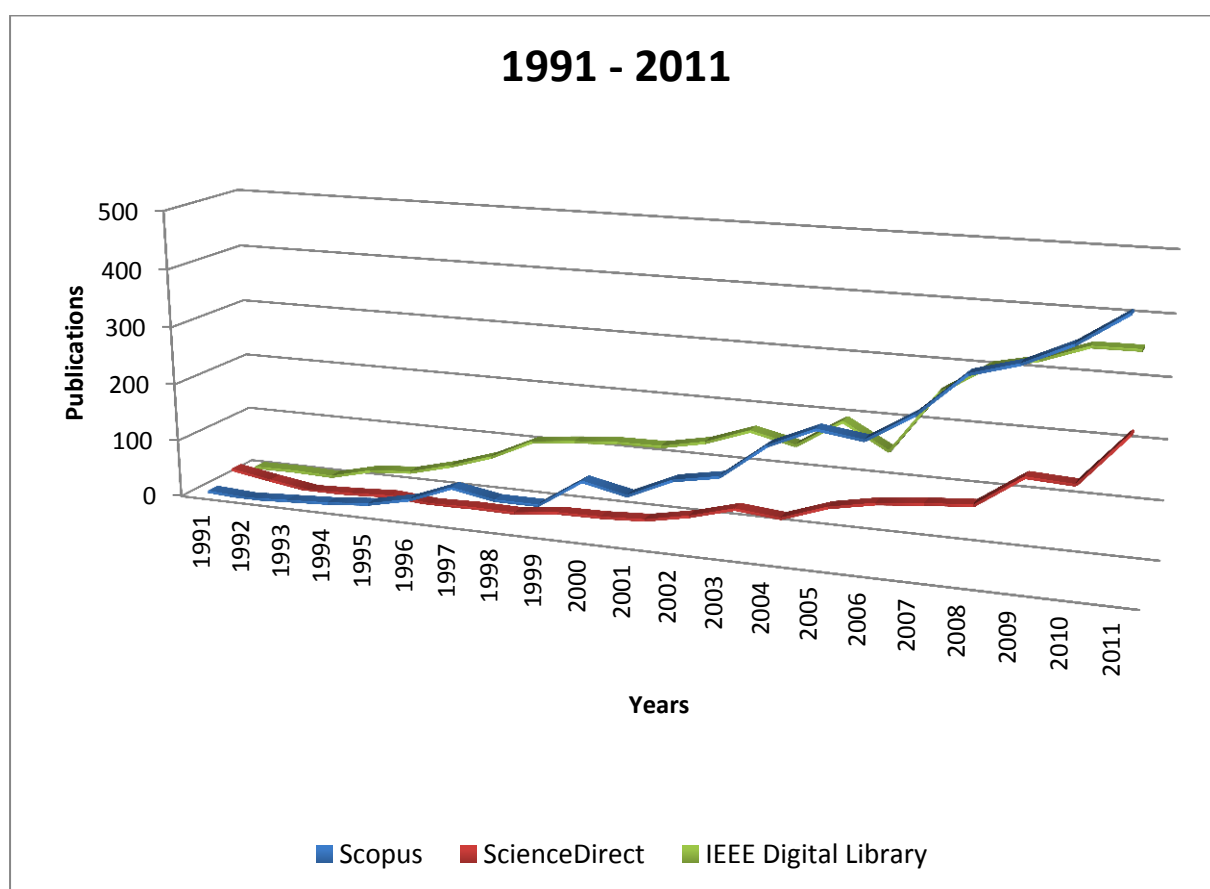
В Табл.1 са представени броя на публикациите по години в областта на InSAR от трите виртуални библиотеки: Scopus, ScienceDirect и IEEE Xplore® Digital Library за

периода от 1990 до първо тримесечие на 2012 включително. Таблицата представя общо 7423 на брой публикации.

SOURCE	SUM	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Scopus	3116	4	5	1	5	9	16	32	61	48	48	97	81	115	129	188	222	212	260	330	352	388	440	73
ScienceDirect	1257	-	23	11	0	3	7	1	3	2	11	12	16	31	52	45	72	87	95	101	155	151	238	141
IEEE Digital Library	3050	3	5	6	4	22	28	47	71	106	114	120	121	136	163	146	194	152	256	305	322	350	351	28

Табл. 1. Брой публикации в Scopus, ScienceDirect и IEEE Xplore® Digital Library за периода от 1990 до 2012.

В Фиг.4 са представени броя на публикациите по години в областта на InSAR от трите виртуални библиотеки в Scopus, ScienceDirect и IEEE Xplore® Digital Library за периода от 1991 до 2011 включително.



Фиг. 4. Брой публикации в Scopus, ScienceDirect и IEEE Xplore® Digital Library за периода от 1991 до 2011.

Показаните по-горе фигури и графики представят съвременно състояние на публикациите в областта на интерферометрията и диферентната интерферометрия. Може ясно да се отбележи прогресивното нарастване на броя на публикациите в световен мащаб в областта за последните 10 години.

1.13. Заключение

В тази глава от дисертационният труд е направен анализ на: методите, техниките и алгоритмите за интерферометричната обработка на сателитни изображения. Обособени са ключовите моменти при използването на технологията, включително: определянето на базовите линии, регистрацията на изображенията, разстилането на фазата, кохерентност, обработката на грешки, приложения и симулатори. Направен е анализ и оценка на съвременното състояние на научната литература в областта, системите, методите и алгоритмите за сателитно дистанционно изследване на земната повърхност.

1.14. Цел и задачи на настоящата дисертация

Обстойният аналитичен преглед и направеният анализ на научната литература в областта на интерферометричната обработка на сателитните изображения показва, че:

- Съществуват значим обем от методи и алгоритми за обработка на сателитни комплексни изображения и стимулационни модели на процесите на формиране на комплексни интерферограми, но към настоящия момент отсъства обобщаващ модел на процеса на формиране на комплексни SAR сигнали, отразени от сложния релеф на земната повърхност, получаване на SAR интерферограми и диферентни SAR интерферограми.
- От особен интерес е проблемът по изграждането на общ алгоритъм за моделиране на сложния геометрически релеф на земната повърхност, модулиращ фазата излъчения SAR сигнал при преотражение от земната повърхност, оценка на влиянието на траекторните параметри на SAR сателитите върху вида и качеството на получените изображения, както и специфичните задачи при съвместната регистрация на двете комплексни изображения и формиране на SAR интерферограмата и SAR диферентна интерферограма, които носят информация за тримерната картина на релефа и неговото изместване.

Оттук могат да се дефинират целта и задачите на дисертационния труд:

Цел на настоящия дисертационен труд: на базата на геометрични и кинематични модели на InSAR сценария, да се изградят математически модели на комплексни SAR сигнали, алгоритми за получаване на комплексни интерферограми и диферентни интерферограми, методи и алгоритми за обработка на сателитни SAR изображения и тяхната програмна реализация в среда на MATLAB.

За постигане на посочената цел се поставят следните основни задачи:

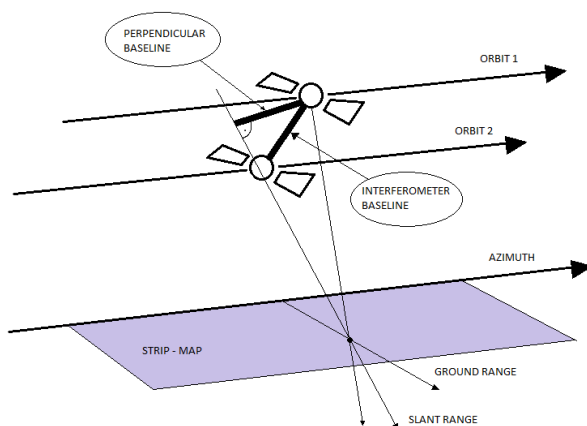
- Да се разработи математически модел, алгоритъм и програмна реализация на процеса за формиране на комплексните SAR сигнали;
- Да се разработи математически модел, алгоритъм и програмна реализация на процеса на получаване на комплексно SAR изображение на земната повърхност;
- Да се разработи математически модел, алгоритъм и програмна реализация на процеса за получаване на комплексна интерферограма и диферентна интерферограма;
- Да се извърши числено експериментиране на моделите и алгоритмите при обработка на натурни SAR изображения получени от данните на сателита ENVISAT.

2. МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСА НА ПОЛУЧАВАНЕ НА КОМПЛЕКСНО SAR ИЗОБРАЖЕНИЕ НА ЗЕМНАТА ПОВЪРХНОСТ

Предмет на настоящата глава е разработване на математически модел на процеса на формиране на комплексните SAR сигналите, модел на процеса за получаване на комплексно SAR изображение и възстановяване на изображението от моделирания сигнал. В следствие от изпълнението на поставената цел се имплементира универсален геометричен модел на релеф на земната повърхност, математически модел на процеса на формиране на отразените от този релеф комплексни SAR сигнали, алгоритми за тяхната обработка и възстановяване на изображението на земната повърхност.

2.1. Геометрично кинематичен сценарий

Разглежда се геометрично кинематичен сценарий, дефиниран в координатна система $Oxyz$. Типична геометрия на InSAR система използваща технологията на многократни облитания е представена на Фиг. 5.



Фиг. 5. Геометрия на InSAR.

Системата SAR е разположена на борда на космически носител със зададени траекторни параметри. Векторното уравнение на движението на космическия носител има вида:

$$(1) \quad \mathbf{R}(p) = \mathbf{R}_0 + \mathbf{V}T_p \left(\frac{N}{2} - p \right),$$

където $\mathbf{R}_0 = \mathbf{R}(0)$ е векторът разстояние от началото на координатната система до сателита в момент $t = N/2$; $\mathbf{V}$ – векторът скорост на сателита; T_p е периодът на повторение на сондиращите импулси; p е индексът на сондиращия импулс; N – пълният брой на сондиращите импулси.

Векторното уравнение (1) се проектира в координатна система $Oxyz$, при което се получава:

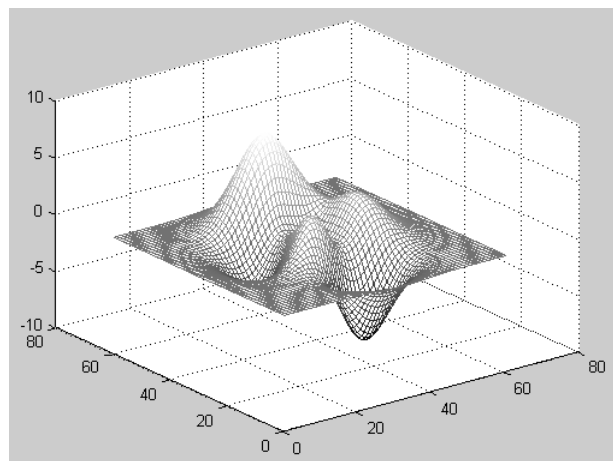
$$\begin{aligned}
 x(p) &= x_0 - V_x T_p \left(\frac{N}{2} - p \right) \\
 (2) \quad y(p) &= y_0 - V_y T_p \left(\frac{N}{2} - p \right), \\
 z(p) &= z_0 - V_z T_p \left(\frac{N}{2} - p \right)
 \end{aligned}$$

където $x(p)$, $y(p)$ и $z(p)$ са координати на сателита в момента p ; $x_0 = x(0)$, $y_0 = y(0)$ и $z_0 = z(0)$ са координати на сателита в момента $p = 0$; $V_x = V \cos \alpha$, $V_y = V \cos \beta$, $V_z = V \cos \gamma$ - проекциите на вектора скорост върху координатните системи; $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$ - направляващи косинуси на вектора скорост.

Наблюдаваната повърхност (Фиг.6), изобразена в координатната система Oxy аналитично се представя, като функция на координатата z от координатите x и y на повърхнината, която в дискретна форма се записва със следното уравнение (3):

$$\begin{aligned}
 z_{mn} &= z_{mn}(x_{mn}, y_{mn}) = 3(1 - x_{mn})^2 \exp[-(x_{mn})^2 - (y_{mn} + 1)^2] \\
 (3) \quad &- 10 \left(\frac{x_{mn}}{5} - x_{mn}^3 - y_{mn}^5 \right) \exp[x_{mn}^2 - y_{mn}^2] \\
 &- \frac{1}{3} \exp[-(x_{mn} + 1)^2 - y_{mn}^2]
 \end{aligned}$$

където $x_{mn} = m\Delta M$, $y_{mn} = n\Delta N$ са дискретните координати в равнината Oxy ; ΔM и ΔN - размерите на разделителния елемент в равнина Oxy ; m и n - относителните дискретни координати (индекси на разделителния елемент) по осите.



Фиг. 6. Геометричен модел на повърхнина, наблюдавана от SAR.

Допуска се, че във всеки разделителен елемент с размер $(\Delta M, \Delta N)$ и координати (x_{mn}, y_{mn}) е разположен един доминиращ точков излъчвател. В процеса на наблюдение вектор разстоянието $\mathbf{R}_{mn}(p)$ от SAR, разположен от сателита до всеки

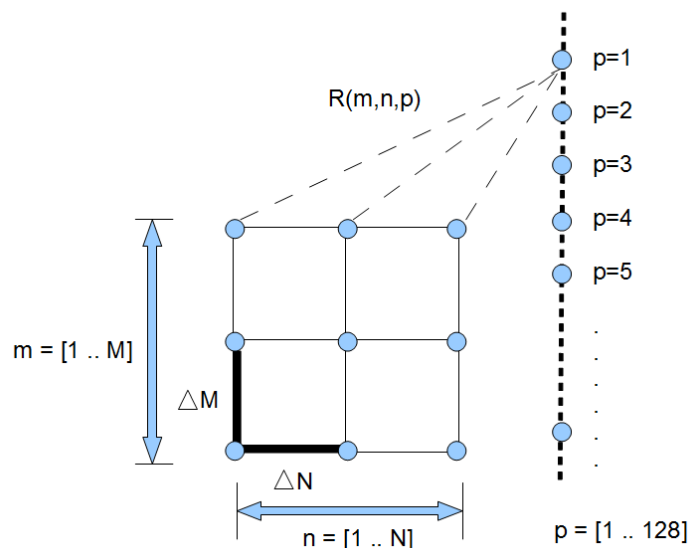
доминиращ точков излъчвател с геометричен вектор $\mathbf{R}_{mn}$, динамично се променя в съответствие с следното векторно уравнение

$$(4) \quad \mathbf{R}_{mn}(p) = \mathbf{R}(p) - \mathbf{R}_{mn}.$$

Информацията за геометрията на наблюдаваната повърхност, която се съдържа в комплексната амплитуда на отразените от нея радиолокационни сигнали, се дефинира с модула на вектора разстояние $R_{mn}(p)$, който се представя със следния израз:

$$(5) \quad R_{mn}(p) = \sqrt{[x(p) - x_{mn}]^2 + [y(p) - y_{mn}]^2 + [z(p) - z_{mn}]^2}.$$

При моделирането на процеса на наблюдение (*синтез на апертурата*) за всяко p , m и n се изчислява величината $R_{mn}(p)$. За улеснение програмната реализация на моделирането, данните от изчислението на разстоянията $R_{mn}(p)$ се представят в тримерна матрица (масив) с размерност $[p, m, n]$ (Фиг.7).



Фиг. 7. Тримерна матрица на данните за разстоянията до доминиращите точкови излъчватели от наблюдаваната повърхност.

2.2. Математическо моделиране на комплексните SAR сигнали, отразени от наблюдаваната повърхност

SAR системата излъчва поредици от електромагнитни вълни към целта, които аналитично се представят с поредица на N линейно честотно модулирани импулси (LFM) както следва:

$$(6) \quad S(t) = \sum_{p=1}^M A \exp \left\{ -j \left[\omega(t - pT_p) + b(t - pT_p)^2 \right] \right\},$$

където A е амплитудата на излъчен импулс, T_p е периода на импулса, $\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda}$ е ъгловата честота, $p = \overline{1, N}$ е текущият брой излъчени линейно честотно модулирани импулси, N е общият брой излъчени импулси по време на апертурния синтез, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s е скоростта на светлината ΔF е дължината на лентата на предадения импулс който осигурява размера на разделителния елемент, т.е. $\Delta R = c / 2\Delta F$, $b = \frac{\pi \Delta F}{T_k}$ е индекс на линейно честотно модулирания импулс, T_k е продължителността на линейно честотно модулирания импулс.

Детерминираната компонента на SAR сигнала, отразен от mn -тия точков излъчвател е крайна функция и може да се определи от израза

$$(7) \quad , S_{mn}(t) = a_{mn}(z_{mn}) \cdot \text{rect} \frac{t - t_{mn}}{T_k} \cdot \exp \left\{ -j \left[\omega(t - t_{mn}) + b(t - t_{mn})^2 \right] \right\} ,$$

където:

$$(8) \quad \text{rect} \frac{t - t_{mn}(p)}{T_k} = \begin{cases} 0, & \frac{t - t_{mn}(p)}{T_k} \leq 0 \\ 1, & \frac{t - t_{mn}(p)}{T_k} \leq 1 \\ 0, & \frac{t - t_{mn}(p)}{T_k} > 1 \end{cases} ,$$

където $a_{mn}(z_{mn})$ е коефициентът на отразяване на пиксел от наблюдаваната повърхност, функция на геометрията на повърхността; времето на закъснение на сигнала на mn -ия доминиращ точков излъчвател, се определя от израз:

$$(9) \quad t_{mn}(p) = \frac{2R_{mn}(p)}{c} ,$$

където $c = 3 \cdot 10^8$ m/s е скоростта на светлината, коефициентът 2 отчита разпространението на електромагнитната вълна от системата SAR до доминиращ точков излъчвател и обратно до системата SAR.

Детерминираната компонента на отразения SAR сигнал $S(t)$ може да бъде пресметнат като сума от елементарни сигнали, отразени от доминиращите точкови излъчватели от повърхността, т.е. $S(t)$ може да бъде записан във вида:

$$(10) \quad S(t) = \sum_n \sum_m a_{mn}(z_{mn}) \cdot \text{rect} \frac{t - t_{mn}(p)}{T_k} \cdot \exp \left\{ -j \left[\omega(t - t_{mn}(p)) + b(t - t_{mn}(p))^2 \right] \right\}$$

Времевата продължителност t на отразения SAR сигнал по разстояние за всеки излъчен импулс p може да бъде изразена в дискретна форма като $t = t_{mn \min}(p) + (k-1)\Delta T$, където $k = \overline{1, K_{\max}(p)}$ е индексът на времевия дискрет, $\Delta T = 1/2\Delta F$ е продължителността на линейно честотно модулирания импулс, ΔF е ширината на честотната лента, $K_{\max}(p)$ е номерът на последната клетка по разстояние, където SAR сигналът е регистриран при всеки излъчен импулс, $t_{mn \min}$ е времето на закъснение от най-близката точка, $R_{mn \min}(p)$ - разстоянието на най-близкия точков излъчвател от повърхността при p -ти излъчен импулс.

Следователно, отразеният SAR сигнал от наблюдаваната повърхност в дискретна форма може да бъде записан във вида:

$$(11) \quad \dot{S}(p, k) = \sum_n \sum_m a_{mn} \cdot \text{rect} \frac{t_{mn \min}(p) + (k-1)\Delta T - t_{mn}(p)}{T_k} \times \\ \times \exp \left\{ -j \left[\omega(t_{mn \min}(p) + (k-1)\Delta T - t_{mn}(p)) + \right. \right. \\ \left. \left. + b(t_{mn \min}(p) + (k-1)\Delta T - t_{mn}(p))^2 \right] \right\}.$$

Изразите (1-11) могат да бъдат използвани за моделиране на отразени комплексни SAR сигнали от повърхност със сложен релеф.

2.3. Възстановяване на комплексното изображение на повърхността от комплексните SAR сигнали

Разглежда се случай на синтез на апертурата при странично, ортогонално на посоката на полета на космическия носител, наблюдение. Тогава в момента $p = N/2$ сателитът ще бъде в равнината Oxz на минимално разстояние от началото на координатната система $Oxyz$. Изменението на фазата на отразените сигнали за периода на наблюдение, измерен с N сондиращи импулса и периодът на повторение на сондиращите импулси не надвишава стойността $\pi/2$, не изисква прилагането на допълнително фокусираща процедура за получаване на качествено изображение. Това дава основание след операцията демодулация на отразения SAR сигнал комплексният образ на наблюдаваната повърхност да се получи посредством две последователни преобразувания на Фурие, т.е.

$$(12) \quad \dot{S}(\bar{k}, \bar{p}) = \sum_{p=1}^N \left[\sum_{k=1}^K \tilde{S}(k, p) \exp \left(-j \frac{2\pi k \bar{k}}{K+L} \right) \right] \exp \left(-j \frac{2\pi p \bar{p}}{N} \right).$$

Изразът се реализира с процедура на бързо преобразуване на Фурие:

$$(13) \quad \dot{S}(\bar{k}, \bar{p}) = \text{FFT}_p[\text{FFT}_k(\tilde{S}(k, p))],$$

където демодулирания SAR сигнал се представя чрез:

$$(14) \quad \tilde{S}(k, p) = S(k, p) \exp \left\{ j \left[\omega(k-1)\Delta T + b((k-1)\Delta T)^2 \right] \right\}.$$

Полученият образ, съдържащ амплитудна и фазова информация е $\dot{S}(\bar{k}, \bar{p})$.

2.4. Алгоритъм за моделиране на комплексните SAR сигнали

Зададен е тримерен релеф на повърхнината $z_{mn}(x_{mn}, y_{mn})$, дефинирана с аналитичния израз (3). Тя е представена като квадратна матрица с размерност $M = 64$ реда, $N = 64$ стълба. Стойностите на елементите на матрицата са височините в тримерната координатна равнина $Oxyz$ на SAR сценария. Размерът на разделителния елемент по оста Ox е $\Delta M = 10m$. Размерът на разделителния елемент по оста Oy е $\Delta N = 10m$. Повърхнината, описана с уравнение (3), е представена на Фиг.6.

Повърхнината се наблюдава със SAR система, разположена на космически носител с траекторни параметри: координати на сателита в момента $p = N/2$, координати на вектор скорост: $V_x = 0$, $V_y = 300$ m/s, $V_z = 0$, начални координати на носителя $x_0 = -10^3$ m, $y_0 = 0$ m, $z_0 = 3.10^5$ m. Параметри на сондиращите импулси: индексът на сондиращия импулс $p \in \overline{1, N_p}$, броят на сондиращите импулси при синтеза на апертурата $N_p = 128$, периодът на повторение на импулса: $T_p = 10^{-2}$ s, продължителността на линейно честотно модулирания импулс $T_k = 10^{-6}$ s, продължителността на дискрета на линейно честотно модулирания импулс $\Delta T = T_k / N_k$; $k = \{1, 2, \dots, K\}$ индексът k и броят K на дискретите на линейно честотно модулирания импулс, носещата честота на излъчвания линейно честотен модулиран импулс $f = 10^{10}$ Hz, честотната лента на импулса е $\Delta F = 1.5.10^8$ Hz.

Изчислява се разстоянието от SAR източник до всеки доминиращ точков излъчвател от наблюдаваната повърхност за всеки дискретен момент p по изрза (5). Изчислява се времевият параметър на закъснение на сигнала за всеки доминиращ излъчвател $t_{mn}(p)$ с израз (9), където $c = 3 \cdot 10^8$ m/s е скоростта на светлината, коефициентът 2 отчита разпространението на електромагнитната вълна от системата SAR до доминиращ точков излъчвател.

Резултатите от изчислението се поместват в тримерна матрица с дименсии $[p, m, n]$. Съставя се едно мерен масив от всички $t_{mn}(p)$ стойности, аранжирани във възходящ ред. Определя се минималната $t_{mn}(p)$ стойност - $t_{mn \min}(p)$. Изчислява се времевият параметър $E_{mn}(k, p)$ на отразения сигнал:

$$(15) \quad E_{mn}(k, p) = t_{mn \min}(p) + (k-1)\Delta T - t_{mn}(p)$$

Изчислява се всеки линейно честотно модулиран сигнал, отразен от m, n – тия доминиращ точков излъчвател за всеки дискрет $k \in \{1, 2, \dots, 128\}$ и излъчен импулс $p \in \{1, 2, \dots, 128\}$.

$$(16) \quad S_{mn}(k, p) = a_{mn} \cdot \exp \left\{ j \left[\omega E_{mn}(k, p) + b(E_{mn}(k, p))^2 \right] \right\}.$$

Резултатите от изчислението се записват в четири мерна матрица (масив) $S_{mn}(k, p)$.

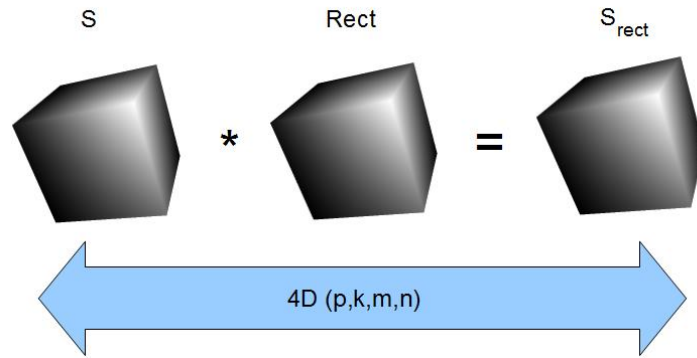
Поради ограничеността на отразения сигнал от всеки доминиращ излъчвател не всяка стойност от него ще участват във формирането на отразения сигнала. Селекцията на стойностите, за сумарния сигнал се извършва чрез поелементно матрично умножение (*матрично умножение на Адамар*) на $S_{mn}(k, p)$ със следната правоъгълна функция:

$$(17) \quad \text{rect}\left(\frac{E}{T_k}\right) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \frac{E}{T_k} < 1 \\ 0, & \frac{E}{T_k} < 0, \frac{E}{T_k} \geq 1 \end{cases},$$

т.е.

$$(18) \quad S_{mn,\text{rect}}(k, p) = \text{rect}\left(\frac{E}{T_k}\right) \cdot S_{mn}(k, p).$$

Правоъгълната функция $\text{rect}\left(\frac{E}{T_k}\right)$ е четири мерна бинарна матрица, която съдържа стойност единица или нула на позиция $[k, p, m, n]$ в зависимост от условие (17).



Фиг. 8. Поелементно умножение на четири мерни матрици.

Поелементното умножение на матрицата на сигнала $S_{mn}(k, p)$ с матрицата, получена от правоъгълната функция $\text{rect}\left(\frac{E}{T_k}\right)$ ще даде в резултат матрица $S_{mn,\text{rect}}(k, p)$, която съдържа само желаните стойности на SAR сигнала, отразен от mn -тия доминиращ точков излъчвател (Фиг.8).

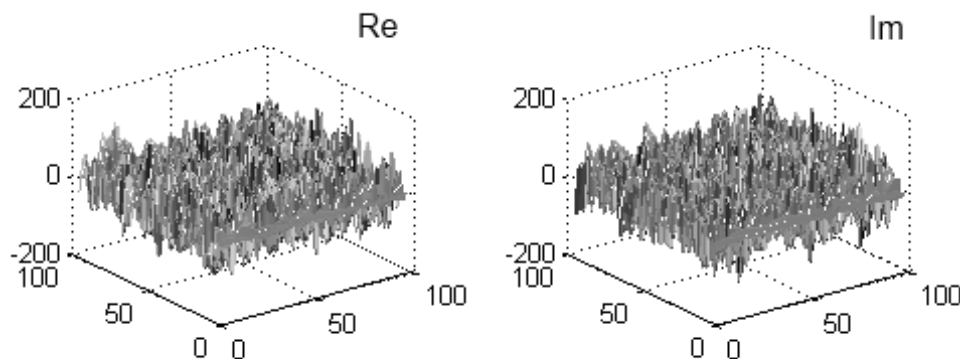
Тогава при сумиране на отразените сигнали по дименсиите m и n ще се получат стойностите на интерферентния сигнал $S(k, p)$, записани като елементи на двумерна матрица с адреси $[p, k]$, т.е.

$$(19) \quad S(k, p) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N S_{mn, \text{rect}}(k, p)$$

2.5. Алгоритъм за възстановяване на комплексното изображение на повърхността от комплексните SAR сигнали

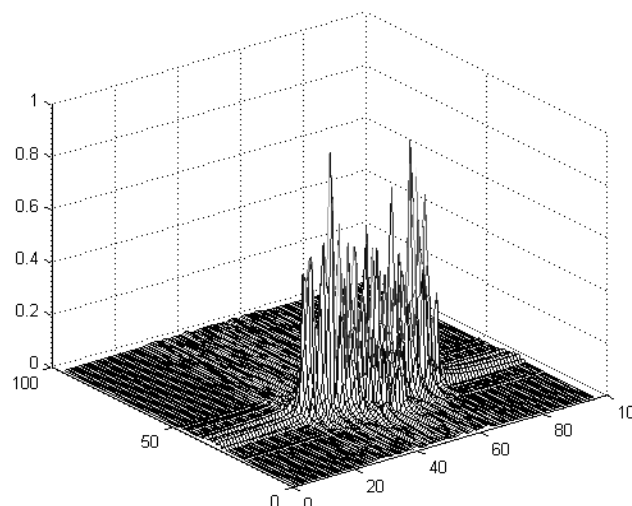
Демодулация на SAR сигнала чрез умножение на двумерната матрица $S(k, p)$ с комплексно спрегнатия излъчен сигнал се извършва с израз (14). Възстановяване на комплексното изображение чрез изчислителна процедура на двукратно бързо преобразование на Фурие, представено математически с израз (12), а програмно с израз (13). Двумерната матрица $\dot{S}(\bar{k}, \bar{p})$ е търсеният комплексен образ на наблюдаваната повърхност, съдържащ амплитудна и фазова информация за всеки пиксел от изображението.

В следващата точка 2.6. е дадена програмната реализация на алгоритъма за възстановяване на комплексното изображение на повърхността от комплексните SAR сигнали. На Фиг.9 е визуализиран полученият комплексен SAR сигнал с неговите: реална компонента (а) и мнима компонента (б).

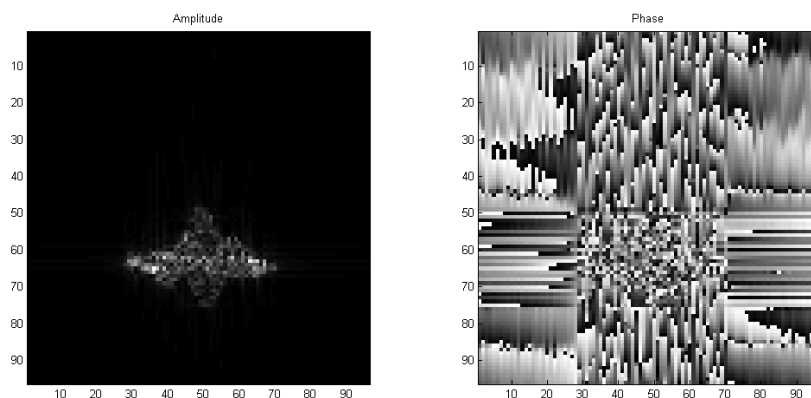


Фиг. 9. Визуализация на получения комплексен сигнал: реална компонента на SAR сигнал (а) и мнима компонента на SAR сигнала (б).

На Фиг.10 е представена реконструкцията на наблюдаваната повърхнина чрез тримерна изометрична проекция. На Фиг.11 е представен комплексният образ на наблюдаваната повърхнина чрез картината на амплитудното разпределение на интензивностите на доминиращите излъчватели (а) и картината на фазите (б), пропорционални на разстоянието от всеки доминиращ точков излъчвател до SAR сателита в момента на реконструкция на изображението ($p = N/2$).



Фиг. 10. Реконструкция на повърхнината: тримерна изометрична проекция на наблюдаваната повърхнина – амплитудна картина.



Фиг. 11. Комплексно изображение на наблюдаваната повърхнина: амплитудна (а) и фазова (б) картина на комплексния образ.

Амплитудната картина на изображението се отличава с висока детайлност, което потвърждава математическата точност на моделирането на геометричната повърхност и отразените от нея SAR сигнали.

2.6. Програмна реализация на алгоритмите за моделиране на комплексните SAR сигнали и възстановяване на комплексното изображение на повърхността

Необходимо е да се изчислят разстоянието от SAR до всеки доминиращ точков излъчвател от наблюдаваната повърхност за всеки дискретен момент p . Стандартно може да се използва програмен фрагмент с вложен цикъл *for* за всяко p , например:

```
% Изчисляване на разстояния и време закъснение на импулсите
for p = 1:Np
    for mn = 1: m_n*m_n
        R(p,mn) = sqrt((Xr(p) - x(mn)).^2 + (Yr(p) - y(mn)).^2 + (Zr(p) - z(mn)).^2);
        T(p,mn)=(2.*R(p,mn))./c;
    end
end
```

Програмният фрагмент обаче би отнел доста време за изчисление. За увеличаване на бързодействието се използва функция за изчисляване на Евклидовите разстояния от SAR до повърхността, написана от *Roland Bunschoten, University of Amsterdam, Intelligent Autonomous Systems (IAS) group*, която е едно редова и има следния синтаксис:

$$R = \text{distance}(a,b).$$

Всъщност, тази функция изчислява Евклидовите разстояния посредством следния MATLAB програмен фрагмент:

$$\begin{aligned} aa &= \text{sum}(a.*a,1); \quad bb = \text{sum}(b.*b,1); \quad ab = a'*b; \\ R &= \text{sqrt}(\text{abs}(\text{repmat}(aa',[1 \text{ size}(bb,2)])) + \text{repmat}(bb,[\text{size}(aa,2) 1]) - 2*ab)); \end{aligned}$$

Разликата във времето за изпълнение между двата фрагмента е представено в Табл.2. Ясно се вижда подобреното време за изпълнение при векторизирана функция (*едно редова*) за изчисляване на Евклидово разстояние в сравнение с реализацията с вложени цикли. Сложността на алгоритъма при векторизирана функция е $O(1)$, докато реализацията за изчисляване на разстоянията и време закъсненията посредством вложен цикъл има сложност $O(n^2)$, като n е броя на импулсите. В конкретния цифров експеримент броя на сондиращите импулси е 512.

Elapsed time is 50.054114 seconds.	Elapsed time is 0.410323 seconds.
------------------------------------	-----------------------------------

Табл. 2. Време за изчисляване на разстоянията R .

Времевиет параметър на закъснение на сигнала за всеки доминиращ излъчвател $T_{mn}(p)$ се изчислява с израза (14), където $c = 3 \cdot 10^8$ m/s е скоростта на светлината, коефициентът 2 отчита разпространението на електромагнитната вълна от системата SAR до доминиращ точков излъчвател. Резултатите от изчислението се поместват в тримерна матрица с дименсии $[p, m, n]$. Съставя се едно мерен масив от всички $t_{mn}(p)$ стойности, аранжирани във възходящ ред. Определя се минималната $t_{mn}(p)$ стойност - $t_{mn \min}(p)$. Изчислява се времевиет параметър $E_{mn}(k, p)$ на отразения сигнал с израз (15). Изчислява се всеки линейно честотно модулиран сигнал, отразен от m, n – тия доминиращ точков излъчвател за всеки дискрет $k \in \{1, 2, \dots, 512\}$ и излъчен импулс $p \in \{1, 2, \dots, 512\}$, прилага се израз (16). Резултатите от изчислението се записват в четири мерна матрица (*масив*) $S_{mn}(k, p)$.

Поради ограничеността на отразения сигнал от всеки доминиращ излъчвател не всяка стойност от него ще участва във формирането му. Селекцията на стойностите, участващи в сумарния сигнал се извършва чрез поелементно матрично умножение (*матрично умножение на Адамар*) на $S_{mn}(k, p)$ с правоъгълната функция дефинирана от израз (17), след което се прилага изчислението израз (18).

Правоъгълната функция $\text{rect}\left(\frac{E}{T_k}\right)$ е бинарна матрица, която съдържа стойност единица или нула, на позиция $[k, p, m, n]$ в зависимост от условието поставено по-горе. Поелементното умножение на матрицата на сигнала $S_{mn}(k, p)$ с матрицата, получена от правоъгълната функция $\text{rect}\left(\frac{E}{T_k}\right)$, ще даде в резултат матрица, която съдържа само желаните стойности на SAR сигнала, отразен от m –тия доминиращ точков излъчвател. Тогава при сумиране на отразените сигнали по дименсиите m и n , ще се получат стойностите на интерферентния сигнал $S(k, p)$, записани като елементи на двумерна матрица с адреси $[p, k]$, израз (19).

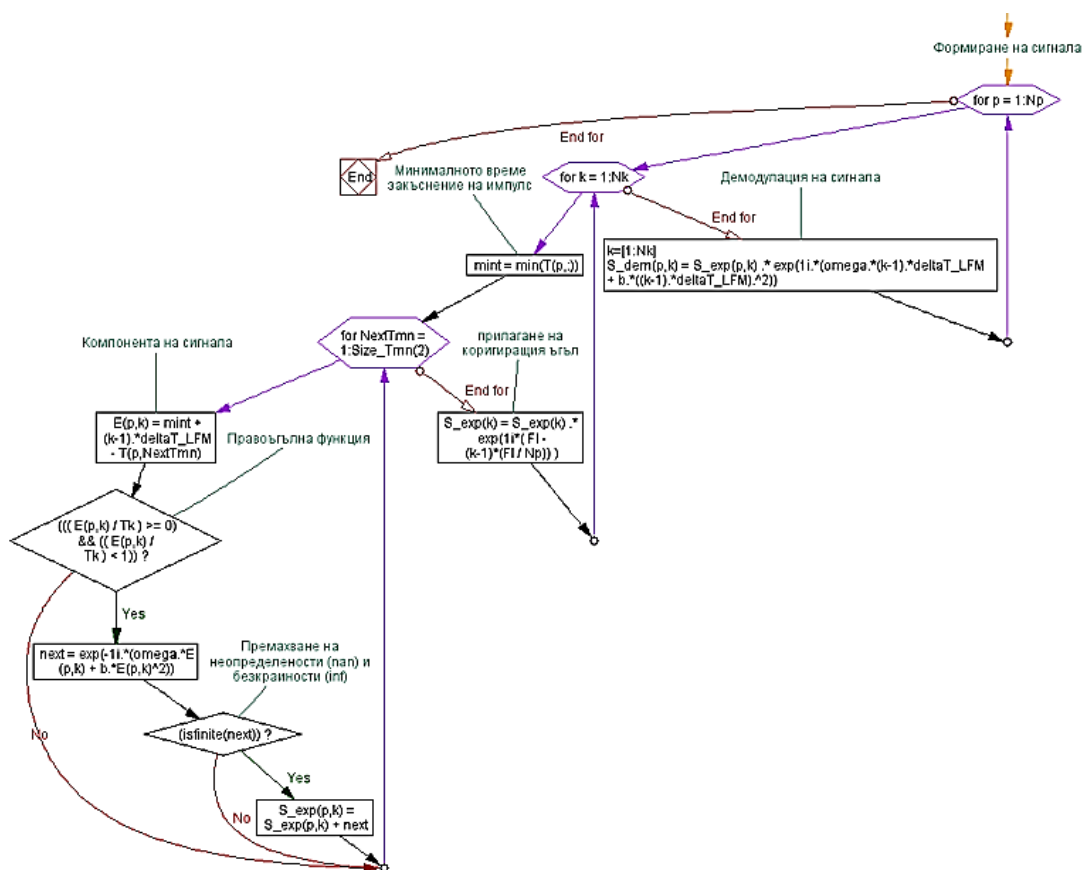
Програмна реализация в среда MATLAB на процеса на формиране на комплексните SAR сигнали е дадена в Табл.3. Блок диаграма на процеса на формиране на SAR сигнал е представена на Фиг.12.

```

%%% Коригиращ ъгъл
FI = (-pi/2) - atan(z1/x1);
%%% Формиране на сигнала
for p = 1:Np
for k = 1:Nk
% Минималното време закъснение на импулс
mint = min(T(p,:));
for NextTmn = 1:Size_Tmn(2)
% Компонента на сигнала
E(p,k) = mint + (k-1).*deltaT_LFM - T(p,NextTmn);
% Правоъгълна функция
if ((( E(p,k) / Tk ) >= 0) && (( E(p,k) / Tk ) < 1))
next = exp(-1i.*(omega.*E(p,k) + b.*E(p,k)^2));
% Премахване на неопределеност (nan) и безкрайност (inf)
if (isfinite(next))
S_exp(p,k) = S_exp(p,k) + next;
end
end
end
% прилагане на коригиращия ъгъл
S_exp(k) = S_exp(k) .* exp(1i*( FI - (k-1)*(FI / Np) ));
end
% Демодулация на сигнала
k=[1:Nk];
S_dem(p,k) = S_exp(p,k) .* exp(1i.*(omega.*(k-1).*deltaT_LFM + b.*((k-1).*deltaT_LFM).^2));
end
%%% записване на комплексното изображение във файл
slc = S_dem;
save slc1.mat slc;

```

Табл. 3. Програмна реализация в среда MATLAB на процеса на формиране на комплексните SAR сигнали.



Фиг. 12. Блок диаграма на процеса на формиране на комплексните SAR сигнали.

Комплексният сигнал $S(k, p)$, формиращ изображенията, съдържащи амплитудна и фазова информация се изчислява за всяка една от сателитните радиолокационни системи и се записва съответно във файлове за последваща обработка.

2.7. Изводи

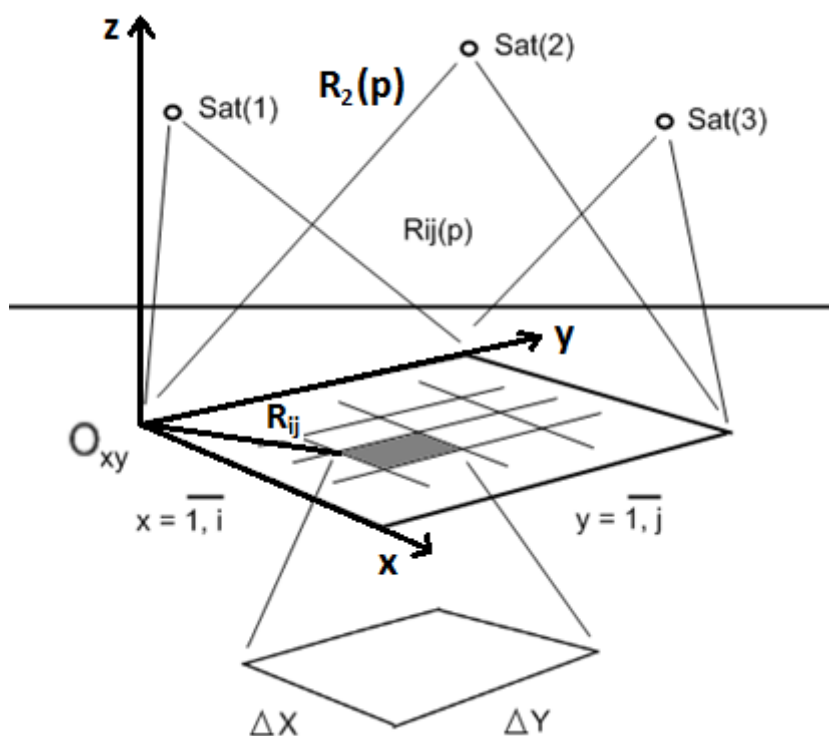
В настоящата глава е разработен матричен математически модел за получаване на комплексни SAR сигнали. Представена е с аналитичен израз сложна повърхнина, която се използва за формирането на комплексните SAR сигнали. Те се представят като четири мерна матрица от данни. За да се опише процесът на формирането на SAR сигналите се използва единична правоъгълна селектираща функция, която генерира четири мерна бинарна матрица. За възстановяване на образите се прилага Фурие трансформация по координатите: разстояние и азимут. Предложеният модел може да бъде използван за генериране на SLC изображения на сложни повърхнини. Приложен е цифров експеримент, реализиран в програмна среда MATLAB. Експериментът демонстрира алгоритъм на моделиране на SAR сигнал и алгоритъм за възстановяване на комплексното изображение от комплексен SAR сигнал.

3. МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ПРОЦЕСА ЗА ПОЛУЧАВАНЕ НА КОМПЛЕКСНА ИНТЕРФЕРОГРАМА

В настоящата глава „математическо моделиране на процеса за получаване на комплексна интерферограма“ са използвани математически модели за симулация на мулти-сателитна интерферометрична система, използваща радиолокационна система със синтезирана апертура, симулация на наблюдение на повърхността от различни позиции и изчисляване на разстоянията до всяка точка от повърхността [123], [124]. Предложените модели записват информацията в GEO TIFF файлове [125]. Използван е алгоритъм за ефективна подпикселна регистрация посредством крос-корелационна процедура с цел корегистрация [126], [127]. Генерирани са диферентни интерферограми демонстриращи изменението в релефа след настъпила деформация. Представените изображения са получени чрез цифрово моделиране в програмната среда MATLAB [128].

3.1. Моделиране на процеса на формиране на InSAR сигнал

Зададена е триизмерна повърхност, която е образувана от пиксели, наблюдавана от множество сателити [129] посредством SAR технология. Всеки един от тези пиксели е дефиниран от третата координата $z_{ij}(x_{ij}, y_{ij})$ в триизмерната координатна система $Oxyz$. Повърхността се облъчва с линейно честотни вълни, излъчвани от предавателите на сателитите $Sat(1)$, $Sat(2)$, $Sat(3)$, представляващи N на брой SAR антени, монтирани на сателитите и наблюдаващи една и съща повърхност. Между всяка двойка $A_m A_n$ от сателити, където $m \neq n = \overline{1, M}$, N е броя на сателитите, може да се дефинира InSAR.



Фиг. 13. Геометрия на InSAR.

Основна геометрична характеристика на SAR сигнала е векторът-разстояние $\mathbf{R}_{ij}(p)$ от SAR системата до всяка точка от наблюдаваната сцена, зададена като вектор (Фиг.13).

$$(20) \quad \mathbf{R}_{ij}^n(p) = \mathbf{R}^n(p) - \mathbf{R}_{ij} = [x_{ij}^n(p), y_{ij}^n(p), z_{ij}^n(p)]^T,$$

където: $n = 1 \div 3$ е номерът на SAR, $\mathbf{R}_{ij}$ е радиус-векторът на ij -тата наблюдавана точка от повърхността, а $\mathbf{R}^n(p)$ е динамичният радиус-вектор на n -тия SAR в изследваната координатна система $Oxyz$. $x_{ij}^n(p)$, $y_{ij}^n(p)$, $z_{ij}^n(p)$ са текущите координати на вектора-разстояние от n -тия SAR до пиксел от повърхнината, измерени в p -тия момент на наблюдението и дефинирани по следния начин:

$$(21) \quad x_{ij}^n(p) = x^n(p) - x_{ij}; y_{ij}^n(p) = y^n(p) - y_{ij}; z_{ij}^n(p) = z^n(p) - z_{ij},$$

където $x_{ij} = i\Delta X$; $y_{ij} = j\Delta Y$; $z_{ij} = z_{ij}(x_{ij}, y_{ij})$ са дискретните координати на пиксел от повърхнината, $x^n(p)$, $y^n(p)$, $z^n(p)$ са динамичните координати на n -тия SAR, които се определят с равенствата:

$$(22) \quad x^n(p) = x_0^n - V_x \left(\frac{N}{2} - p \right) T_p; y^n(p) = y_0^n - V_y \left(\frac{N}{2} - p \right) T_p; z^n(p) = z_0^n - V_z \left(\frac{N}{2} - p \right) T_p,$$

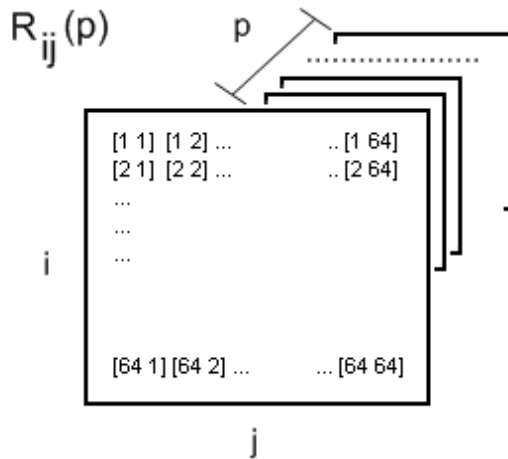
където x_0^n , y_0^n , z_0^n са началните координати на n -тия SAR, изчислени в момента $p = \frac{N}{2}$; T_p е периодът на повторение; p е броят на излъчените импулси. $\mathbf{V} = [V_x, V_y, V_z]^T$ е векторът-скорост на SAR мулти сателитната система; $V_x = V \cos \alpha$, $V_y = V \cos \beta$, $V_z = V \cos \delta$ - са компоненти на вектора скорост; $\cos \alpha$, $\cos \beta$ и $\cos \delta = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta}$ са насочващите косинуси и V е модулът на вектора скорост.

Модулът на вектора разстояние на ij -тия пиксел, измерен от n -тата SAR антена се дефинира от следния израз:

$$(23) \quad R_{ij}^n(p) = \{ [x_{ij}^n(p)]^2 + [y_{ij}^n(p)]^2 + [z_{ij}^n(p)]^2 \}^{\frac{1}{2}}.$$

Израз (23) ще се използва за моделиране на n -тия SAR сигнал, отразен от ij -тия пиксел от повърхнината.

В предложения модел векторът-разстояние се представя посредством p на брой матрици с размерност $I \times J$ (Фиг. 14), където I е броят на пикселите по координатната ос Ox , J – броят на пикселите по координатната ос Oy .



Фиг. 14. Матрица на разстоянието до ij -тия пиксел.

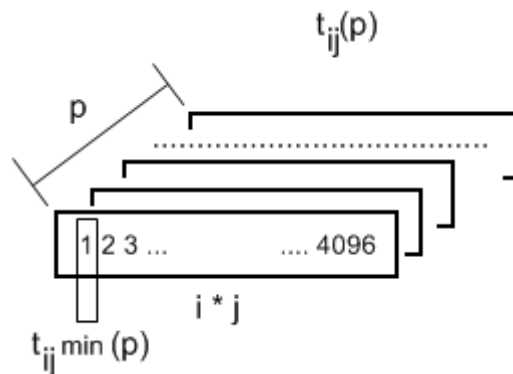
Времето на закъснението на сигнала за всяко p , отразен от ij -тия пиксел се определя от израза (24):

$$(24) \quad t_{ij}^n(p) = \frac{2R_{ij}^n(p)}{c},$$

където: $p = \overline{1, M}$ е текущия брой излъчени импулси, M е общия брой на импулсите, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s е скоростта на светлината, $R_{ij}^n(p)$ е вектора разстояние до ij -тия пиксел.

Изчисляват се времената на закъснение от всички пиксели от наблюдаваната повърхност, т.е. за $i = \overline{1, I}$, $j = \overline{1, J}$, където I е броят на пикселите по азимут, J - броят на пикселите по разстояние. Общият им брой е $(I \cdot J)$. Времената на закъснение $(I \cdot J)$ се аранжират във възходящ ред и се индексират (номерирант) с индекс $l = \overline{1, I \cdot J}$.

Представянето на данните е демонстрирано на (Фиг.15). За разгледания пример i и j се изменят в интервала $[0 \dots 64]$, а p – броят на импулсите е равен на 128. За всяко p се намира стойността на най-малкото t . След подреждането на стойностите на t във възходящ ред, това е първата стойност на t за всяко p .



Фиг. 15. Време закъснение.

След изчисление на $R_{ij}^n(p)$, $t_{ij}^n(p)$ и $t_{ij\min}^n(p)$ следва формиране на InSAR сигнала. Детерминираниите компоненти на SAR сигнала са получени чрез прилагане на физически оптичният принцип на *Huggens-Fresnel*, според който InSAR сигнала може да бъде изчислен като сума от елементарни сигнали, отразени от пикселите на обекта, т.е. времевия запис на данните $S^n(p, k)$ може да бъдат записан като:

$$(25) \quad \dot{S}^n(p, k) = \sum_i a_i(z_i) \text{rect} \frac{Q}{T} \exp \left\{ -j[\omega Q + bQ^2] \right\},$$

където:

$$(26) \quad Q = t_{i\min}^n(p) + (k-1)\Delta T - t_i^n(p),$$

където: $p = \overline{1, M}$ е текущият номер на излъчения импулс; M е общият брой на импулсите; $\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda}$ е ъгловата честота; T е времевата продължителност на импулса; $a_{ij}(z_{ij})$ е коефициента на отражение (нормирана интензивност) на пиксел от обектното пространство. Параметърът $a_{ij}(z_{ij})$ е функция от геометрията на повърхността и отразяващите свойства на всеки пиксел. За удобство на изчисленията $a_{ij}(z_{ij})$ се приема константна величина.

Правоъгълната бинарна функция $\text{rect} \frac{Q}{T}$, участваща в сумата от израз (25), се определя като правоъгълна функция, т.е.:

$$(27) \quad \text{rect} \frac{Q}{T} = \begin{cases} 0, & \frac{Q}{T} \leq 0 \\ 1, & 0 < \frac{Q}{T} \leq 1 \\ 0, & \frac{Q}{T} > 1 \end{cases}.$$

Функцията извежда резултатна стойност единица или нула, като определя дали поредният сигнал да участва в сумата от израза (25) или да не участва.

3.1.1. Геометрия на InSAR

Ако две позиции на сателита ENVISAT (Фиг.16) с инструмента ASAR се дефинират като S_1 и S_2 [130], тогава за позицията S_1 е в сила следната геометрична релация [131]: $S_1 P_0 = R_0$ - линия на визиране, R_0 - разстоянието от сателита S_1 до референтната точка P_0 , лежаща на нулево ниво, $S_1 P_1 = \sqrt{(R_0 + R_p)^2 + N_p^2}$ - е разстоянието до точката на интерес, $R_p = P_0 P$ - е изместване на вълната по плоската фаза по протежение на линията на визиране от референтната точка P_0 към точката P_1 ,

лежаща в най-близката резолюционна клетка на височина $q = P_1 P_2$ от нулевото ниво.

За позиция $S_2 : S_2 P_1 = \sqrt{(R_0 + R_p - B_r)^2 + (N_p - B_n)^2}$.

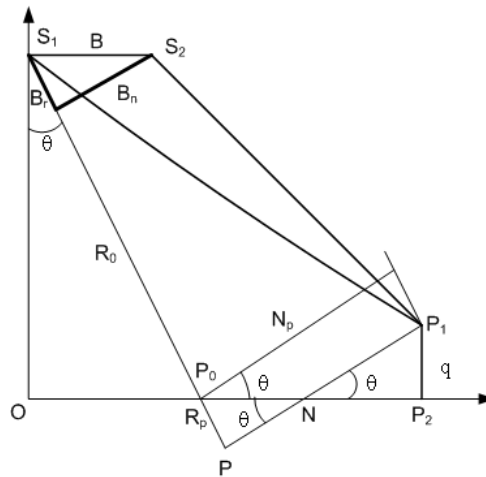
След няколко математически манипулации, вариациите на разстоянието $\Delta R = (S_2 P_1 - S_1 P_1)$ могат да бъдат изразени като:

$$(28) \quad \Delta R = \frac{B_n N_p}{R_0} = \frac{B_n}{R_0} \left(\frac{R_p}{\tan \theta} + \frac{q}{\sin \theta} \right)$$

Фазовата разлика Φ , съответстваща на вариациите на разстоянието ΔR е пропорционална на разликата на изминатия път $2\Delta R$ (факторът 2 е двупосочния път от S_1 и S_2 до P_1), т.е..

$$(29) \quad \Phi = k(2\Delta R),$$

където $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ е номер на дължината на вълната; λ е дължината на вълната.



Фиг. 16. InSAR геометрия.

Следователно на база израз (28) фазовите разлики, наречени интерферометрична фаза могат да бъдат записани като:

$$(30) \quad \Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n}{R_0} \left(\frac{R_p}{\tan \theta} + \frac{q}{\sin \theta} \right).$$

Фазовите разлики са разделени в две компоненти: $\Phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n}{R_0} \left(\frac{R_p}{\tan \theta} \right)$ - фазова разлика пропорционална на изместване по наклонено разстояние R_p от точкови цели P_1 и P_0 . $\Phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n}{R_0} \left(\frac{q}{\sin \theta} \right)$ - фазова разлика пропорционална на височинна разлика q между точкови цели P_1 и P_0 , спрямо хоризонталната референтна плоскост.

Умножението на комплексната интерферограма с комплексно спрегнатата фаза, условие $\exp(-j\Phi_1)$, се нарича оплоскостяване на интерферограмата. Тази процедура, генерира фазова карта, пропорционална на височината на релефа. Промяната на фазата заедно с височината се дава с израз:

$$(31) \quad \frac{d\Phi}{dq} = \frac{4\pi \cdot B_n}{\lambda R_0 \sin \theta}.$$

Това отношение описва чувствителността по височина при интерферометричните изследвания, което още може да се дефинира като *височина на неопределеност*.

Височината на неопределеност H_a се дефинира като височинна разлика, която е генерирана от интерферометричната фаза при изменение 2π след оплоскостяване на интерферограмата. Височината на неопределеност е пропорционална на дължината на вълната, обхвата по наклонено разстояние и синуса от ъгъла на наблюдение θ , и обратно пропорционална на перпендикулярната базова линия B_n :

$$(32) \quad H_a = \frac{\lambda R_0 \sin \theta}{2B_n}.$$

На базата на израз (32) се препоръчват по-дълги базови линии, за да се осигури точност на измерване на височината, но има теоретични и практически граници. Над определена базова линия (наречена: критична базова линия), спектралното изместване между двете SAR изображения надвишава честотната лента, и интерферограми не могат да бъдат формирани.

3.1.2. Измерване на движението на терена. Диферентна интерферометрия

Движението на терена може да бъде открито в случай когато отразяващите точки от земната повърхност изменят своята относителна позиция във времеви интервал между получаването на две SAR изображения (*в случаите като: свличания, земни измествания, земетресения и др.*). Допълнителното условие за фазата, независимо от базовата линия е пропорционално на проекцията d от изместването по направление на наклонено разстояние, т.е.

$$(33) \quad \Phi_3 = -\frac{4\pi}{\lambda} d.$$

По този начин след оплоскостяване на интерферограмата резултатната интерферометрична фаза съдържа участници за височина и движение, т.е.

$$(34) \quad \hat{\Phi} = \Phi_2 + \Phi_3 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n}{R_0} \left(\frac{q}{\sin \theta} \right) - \frac{4\pi}{\lambda} d.$$

За да се разкрие участникът за движение от фазата, се използва диферентна интерферометрична техника. Да вземем например единична интерферометрична

двойка (*главно и подчинено изображения*), получени с не нулева базова линия и нека е наличен цифров модел на релефа. Стъпките на обработка са следните:

- Цифровия модел на релефа е необходимо да бъде конвертиран от географски в SAR координати и височината трябва да бъде конвертирана в интерферометрични фази. Базовата линия трябва да бъде същата като тази при използваната интерферометрична двойка.
- Синтезираните интерферометрични фази трябва да бъдат извадени от тези на наличната интерферометрична двойка. Тази операция може да бъде извършена в комплексната област, чрез умножение на действителната интерферограма с комплексно спрегнатата синтезирана интерферограма.

В случай с три SAR изображения и без участник за движение в терена между две от изображенията, едно от трите трябва да бъде избрано за главно изображение. Тогава могат да бъдат генерирани две интерферограми: двете подчинени изображения се корегистрат спрямо главното изображение. Най-късата времева разлика (*за да се гарантира кохерентност и да се избегне движение на терена*) и средна/висока базова линия (*за да се осигури височинна точност на измерването*) трябва да бъдат избрани за първата интерферометрична двойка. Втората интерферометрична двойка трябва да има висока времева разлика (тя трябва да съдържа изменение на терена). Процесът на интерферометрична обработка включва следните стъпки:

- Първата интерферограма трябва да бъде разстелена и скалирана в отношение с двете базови линии.
- Нейната фаза трябва да бъде свита отново и извадена от фазата на втората интерферограма (обикновено това се извършва в комплексната област).

Ако базовите линии на двете интерферометрични двойки са цяло число, разстилането на фазата може да бъде избегнато. Фазите на една интерферограма могат да бъдат директно скалирани чрез цяло число между базовите линии и извадени от фазите на другата интерферограма.

3.1.3. Корегистрация

Корегистрацията е фундаментална стъпка в процеса на генериране на интерферограма и се състои в дефинирането на корегистрационните коефициенти. Това действие гарантира, че всяка точка от целта на повърхността ще участва в един и същи пиксел (по разстояние и азимут) както в главното, така и в подчиненото изображение. Правилното подравняване между двете изображения трябва да бъде извършено на база пиксел по пиксел с точност една десета от резолюцията или повече.

Корегистрацията зависи от топографията на местността. Въпреки това, влиянието на височината е почти незначително в повечето случаи. Следователно корегистрационната карта може да осигури гладък полином, който да апроксимира пиксел по пиксел изместването с презумпцията, че целите лежат на елипсовидна земна повърхност. В сателитните SAR системи, като ERS и Envisat - ASAR сензора за скорост и височина са толкова стабилни, че изместването главно-подчинено

изображения в рамките ($100 \times 100 \text{ km}$) може да бъде апроксимирано от следния полином:

$$(35) \quad r^S = a(r^M)^2 + br^M + c(as)^M + d$$

$$(36) \quad (as)^S = e(r^M)^2 + fr^M + g(as)^M + h,$$

където r^M , $(as)^M$ са координати по разстояние и азимут на пикселите от главното SAR изображение; r^S , $(as)^S$ са координати по разстояние и азимут на пикселите от подчиненото SAR изображение. Корегистрационните коефициенти могат да бъдат изчислени с помощта на метода на най-малките квадрати, базиран на регулярна решетка от точки, разположени върху цялата рамка на SAR изображението.

Корегистрация посредством корелация е предложена в източници [132] и [133]. Крос-корелацията е сходна на конволюцията. Ако са дадени ръбовете на две изображения $A(y,x)$ и $B(y,x)$, където $1 \leq y \leq M$ и $1 \leq x \leq N$, то:

$$(37) \quad A(y,x) \odot B(y,x) = K(\delta y, \delta x) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M A(j,k) B(\delta y + j, \delta x + k) = \text{IFFT}[\text{FFT}[A] \text{FFT}[B]^*],$$

където функциите $\text{FFT}[\dots]$ и $\text{IFFT}[\dots]$ са съответно права и обратна дискретна трансформация на Фурие (*Discrete Fourier Transform*). Операторът (*) указва комплексна спрегнатост. Големи стойности на $K(\delta y, \delta x)$ показват, че $B(y+\delta y-1, x+\delta x-1)$ и $A(y,x)$ са сходни. Максималното $K(\delta y, \delta x)$ предполага, че B е изместено с $(\delta y-1, \delta x-1)$ спрямо A . Подобно на конволюцията, корелацията може да бъде изчислена в честотната област.

Спектърът на изместено изображение се дава с израза:

$$(38) \quad A(y,x) = \sum_{w=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(w,v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{yw}{M} + \frac{xv}{N} \right) \right], 0 \leq w \leq M, 0 \leq v \leq N$$

$$(39) \quad \begin{aligned} A(y+\delta y, x+\delta x) &= \sum_{w=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(w,v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{(y+\delta y)w}{M} + \frac{(x+\delta x)v}{N} \right) \right] = \\ &= \sum_{w=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(w,v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{yw}{M} + \frac{\delta y w}{M} + \frac{xv}{N} + \frac{\delta x v}{N} \right) \right] = \\ &= \sum_{w=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(w,v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{\delta y w}{M} + \frac{\delta x v}{N} \right) \right] \exp \left[2\pi i \left(\frac{yw}{M} + \frac{xv}{N} \right) \right] = \text{IFFT}[c(w,v)] \end{aligned}$$

$$\text{където: } c(w,v) = a(w,v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{\delta y w}{M} + \frac{\delta x v}{N} \right) \right].$$

Изместване $(\delta y, \delta x)$ във времевата област, причинява фазово изместване $2\pi(w \delta y/M + v \delta x/N)$ във всеки елемент (w,v) от спектъра $a(w,v)$.

Фазовите съотношения на изображенията $A(y,x)$ и $B(y,x)$ с изместване от $(\delta y, \delta x)$ пиксела в пространството се дават с израза:

$$(40) \quad B(y,x) = A(y+\delta y, x+\delta x),$$

а в честотната област с изрази

$$(41) \quad b(w, v) = a(w, v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{\delta y w}{M} + \frac{\delta x v}{N} \right) \right].$$

Разликата във фазите между елементите $a(w, v)$ и $b(w, v)$ е свързана само с изместването на изображението, т.е.

$$(42) \quad d(w, v) = b(w, v) a(w, v)^* = |b(w, v)| |a(w, v)| \exp \left[2\pi i \left(\frac{y w}{M} + \frac{x v}{N} \right) \right].$$

Посредством анализ на фазите на $d(w, v)$ се определя $(\delta y, \delta x)$.

Програмната реализация на метода е в среда MATLAB. При зададени две изображения f и g , функцията за корегистрация на изображения с подпикселна точност чрез корелация изисква три входни параметъра, както следва: първите два параметъра са бързо дву-дументионно Фурие преобразование на двете изображения f и g (fft2 среда МАТАВ), а третият параметър е търсеният фактор на под пикселно ниво, например цифра 10, което означава 1/10 от пиксела.

Първото изображение се мащабира с множител 2 за получаване на вградената първоначална оценка на Фурие в два пъти по-голям масив. Ако резолюцията е $M \times N$, то новите са $M*2$ и $N*2$. Създава се дву-дименсионен масив CC с новите дименсии $M*2$ и $N*2$, инициализиран първоначално с нулеви стойности.

По нататък крос-корелационният масив се попълва от стойностите без ръбовете, т.е. $CC(m+1-\text{fix}(m/2):m+1+\text{fix}((m-1)/2), n+1-\text{fix}(n/2):n+1+\text{fix}((n-1)/2)) = \text{fftshift}(\text{buf1ft}) .* \text{conj}(\text{fftshift}(\text{buf2ft}))$;

Извличат се индексите с максимални стойности $CC_{\max}$. Крос корелацията CC се получава от обратно бързо Фурие преобразование върху изместеното обратно Фурие преобразование за индексите от $CC_{\max}$, т.е. $CC = \text{ifft2}(\text{ifftshift}(CC_{\max}))$. После се получават изместванията в оригиналната пикселна мрежа от позицията в кроскорелационния масив.

Ако локалният максимум по редове е по-голям от цялата част на $M/2$, то изместването по редове е: $\text{row_shift} = \text{rloc} - m - 1$, в противен случай е $\text{row_shift} = \text{rloc} - 1$. Ако локалният максимум по колони е по-голям от цялата част на $N/2$, то изместването по редове е: $\text{col_shift} = \text{cloc} - n - 1$, в противен случай е $\text{col_shift} = \text{cloc} - 1$. След което се определят изместванията $\text{row_shift} = \text{row_shift}/2$ и $\text{col_shift} = \text{col_shift}/2$.

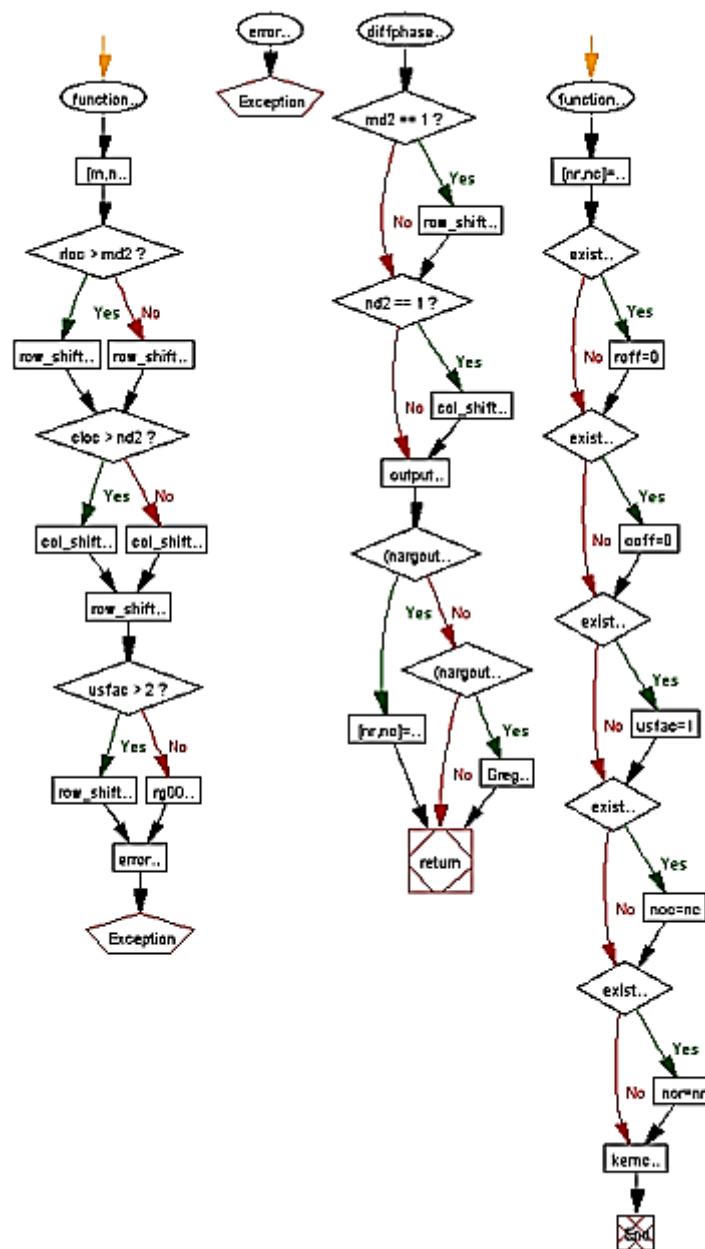
Ако търсеният фактор на подпикселно ниво е по-голям от две, то оценката се прецизира чрез умножение с дискретното Фурие преобразование на нова пикселна мрежа. Първоначалното изместване се оценява в новата мрежа, намира се максимумът в кроскорелационния масив, след което се извършва обратна пикселна трансформация към оригиналната пикселна мрежа.

Ако търсеният множител на подпикселно ниво е равен на 2, то не е необходимо допълнително прецизиране на пикселно изместване. Диферентната фаза се получава

като $\arctan$ от реалната и мнимата компонента на CC_{max} , т.е. $\text{diffphase} = \text{atan2}(\text{imag}(CC_{max}), \text{real}(CC_{max}))$. Ако дори само в един ред и/или колона по това измерение изместването няма никакъв ефект, изместването по редове и колони се определя като нула.

След дефиниране на коефициентите на изместването (*редове и/или колони*), се определя корегистрирана версия на второто изображение и функцията извежда изчисления резултат обратно в програмата, която я извиква.

Блок схема на програмната реализация е представена на следващата фиг.17:



Фиг. 17. Блок схема за корегистрация на изображения посредством корелация

Грешката в изместване на пикселите (разлика между истинските и получените

измествания) е между 0,0016 и 0,0043 в посоките X и Y съответно. Реализирана е точност по-висока от 0.01 от пиксел. При използването на конвенционален FFT подход със същата точност би изисквало изчисляване на 25600 x 25600 операции FFT, което би отнело продължително изчислително време.

Чрез този метод и използване на спектрална информация в [132] и [133] е постиганата висока под-пикселна точност. Крос-корелационният анализ осигурява надеждна оценка на изместването. Прогнозата е точна в рамките на едни пиксел. Точността може да бъде подобрена чрез оценка на спектъра на изображението, при което достижимата точност е стотни от размерите на пиксела.

3.1.4. Кохерентност

Предварително условие за изчисляване на интерферограмата е, че фазата в рамките на пиксел се запазва. Комплексната кохерентност оценява фазовите разлики между пикселите в две SAR изображения.

Кохерентността на корегистрираните SAR изображения се изчислява като модул на комплексните коефициенти на кохерентност, дефинирани за отделните пиксели в главното и подчиненото изображения и може да се представи с израз:

$$(43) \quad \dot{\gamma} = \frac{\sum_{a \in N} \sum_{r \in K} S_{ar}^M (S_{ar}^S)^*}{\left\{ \sum_{a \in N} \sum_{r \in K} S_{ar}^M (S_{ar}^M)^* \times \sum_{a \in N} \sum_{r \in K} S_{ar}^S (S_{ar}^S)^* \right\}^{\frac{1}{2}}},$$

където S_{ar}^M и S_{ar}^S са комплексните интензивности на ar -тия (разстояние-азимут) елемент от главното и подчиненото изображения, N е броят на елементи по азимут и K е броят на елементи по разстояние за определен пиксел в SAR изображението. Оценката на кохерентността $\text{mod}(\dot{\gamma})$ (наричано още степен на кохерентност) се използва за описание на фазовата взаимна корелация.

3.2. Пример на модел на комплексна SAR интерферограма

3.2.1. SAR геометрично описание

SAR системата емитира серия от линейно честотно модулирани електромагнитни импулси, които аналитично могат да бъдат дефинирани от изразите във втора глава. Детерминистичният компонент на SAR сигнала отразен от цялата наблюдавана земна повърхност може да бъде разглеждан като геометрична сума на сигналите отразени от всички излъчващи точки. За получаване на геометричната информация на наблюдаваната повърхност се използва предложението в глава 2 математически модел на процеса на формиране на комплексни SAR сигнали и математическо моделиране на процеса на получаване на комплексно SAR изображение. Изразите от (1) до (19) са използвани за моделиране на SAR сигнали, отразени от повърхността на сложен релеф, вж. израз (3) и изображен на Фиг.6.

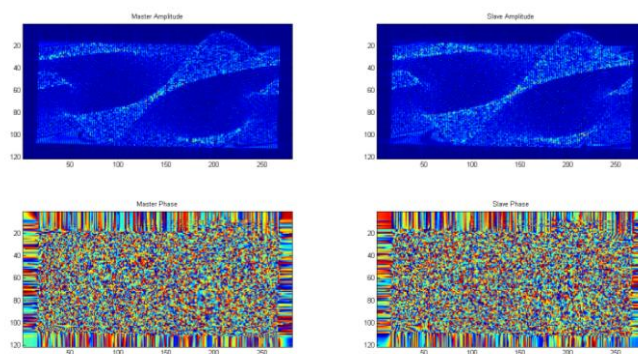
3.2.2. Алгоритъм за възстановяване на образа от комплексно SAR изображение

Разглежда се SAR сателитна система, която наблюдава повърхността в направление перпендикулярно на посоката на движение на сателита. Изображението на наблюдавания район се възстановява в момента $p = N/2$, което съответства на половината от размера на синтезираната апертура. Броят на излъчените импулси N , скоростта на сателита и периода на повторение на импулсите са така избрани, че да гарантират разлики във фазите на отразените сигнали по време на апертурния синтез не повече от $\pi/2$. Следователно не са необходими допълнителна корекция на фазата и фокусираща процедура. Това позволява възстановяване на образа с помощта на две бързи Фурие трансформации на демодулирания комплексен SAR сигнал (12), което може да бъде имплементирано в програмната среда на продукта MATLAB® с функцията Fast Fourier Transform (FFT), (13). Параметрите на двете сателитни системи са представени в Табл.4.

	SAR1	SAR2
X, km	170,3	170,8
Y, km	10	10
Z, km	300	300
Np	512	512
Nk	512	512
m_n	140	140
delta	5	5
V, m/s	-1800	-1800
Tp, s	0.008	0.008
Tk, s	0.02	0.02
F, GHz	10	10
deltaf, MHz	200	200

Табл. 4. Параметри на двете сателитни системи

Алгоритъм за възстановяване на SAR изображението, представен в изрази (12) и (13), се използва за генериране на две комплексни изображения: главно и подчинено. Базовата линия между SAR системите е така избрана, че от главното и подчиненото комплексни изображения се генерира комплексна интерферограма, посредством комплексно спрегнатото им умножение, без корегистрационна процедура.



Фиг. 18. (а) Амплитуда и фаза на главното изображение, (б) Амплитуда и фаза на подчиненото изображение.

3.2.3. Изчисляване на кохерентната карта и интерферограма

Главното комплексно изображение може аналитично да бъде представено със следния матричен израз

$$\begin{aligned} \dot{A}_M &= A_M \cdot e^{i\Phi_M} = \text{Re}(\dot{A}_M) + j \text{Im}(\dot{A}_M) \\ (44) \quad A_M &= \sqrt{\text{Re}^2(\dot{A}_M) + \text{Im}^2(\dot{A}_M)} \quad , \\ \Phi_M &= \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{A}_M)}{\text{Re}(\dot{A}_M)}\right) \end{aligned}$$

където A_M е амплитудата, а Φ_M е фазата на главното комплексно изображение.

Подчиненото комплексно изображение може аналитично да бъде представено със следния матричен израз

$$\begin{aligned} \dot{A}_S &= A_S \cdot e^{i\Phi_S} = \text{Re}(\dot{A}_S) + j \text{Im}(\dot{A}_S) \\ (45) \quad A_S &= \sqrt{\text{Re}^2(\dot{A}_S) + \text{Im}^2(\dot{A}_S)} \quad , \\ \Phi_S &= \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{A}_S)}{\text{Re}(\dot{A}_S)}\right) \end{aligned}$$

където A_S е амплитудата, а Φ_S е фазата на подчиненото комплексно изображение.

Главното (44) и подчиненото (45) комплексни изображения генерират комплексна интерферограма, посредством матричното комплексно спрегнато умножение, т.е.

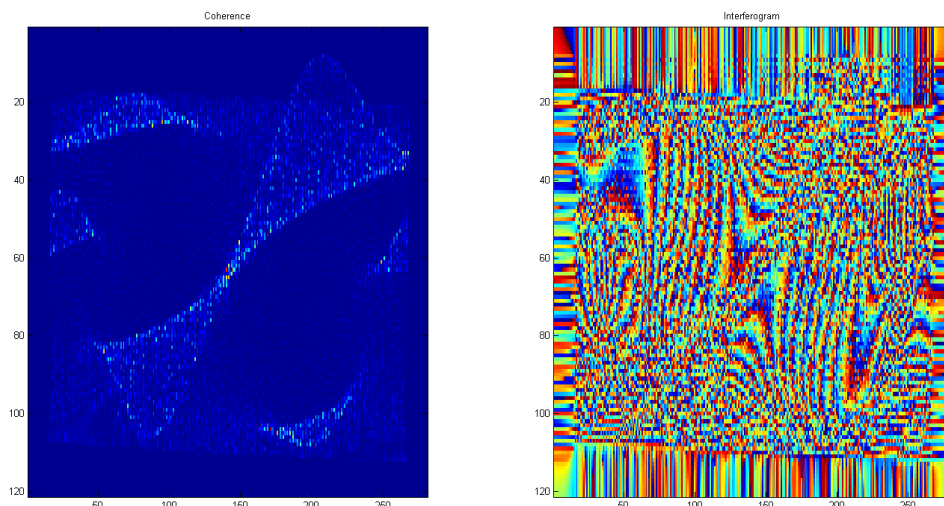
$$(46) \quad \dot{I} = \dot{A}_M * \dot{A}_S^* = A_M \cdot e^{i\Phi_M} A_S \cdot e^{-i\Phi_S} = A_M A_S \cdot e^{i(\Phi_M - \Phi_S)}.$$

Модулът на комплексната интерферограма (46) ни дава кохерентната карта, докато фазата е действителната интерферограма. Това е представено чрез израз (47):

$$\begin{aligned} Coh &= A_M A_S = \sqrt{\text{Re}^2(\dot{I}) + \text{Im}^2(\dot{I})} \\ (47) \quad Int &= \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{I})}{\text{Re}(\dot{I})}\right) \quad . \end{aligned}$$

В програмна среда MATLAB® , изображението на кохерентната карта - *Coh* се извлича с помощта на функцията - *ABS*, а изображението на интерферограмата - *Int* с помощта на функцията - *ANGLE*.

Експерименталните резултати са илюстрирани на Фиг. 19. Във Фиг. 19, б може да бъде наблюдавана деформацията породена от изменението на наблюдаваната земна повърхност.

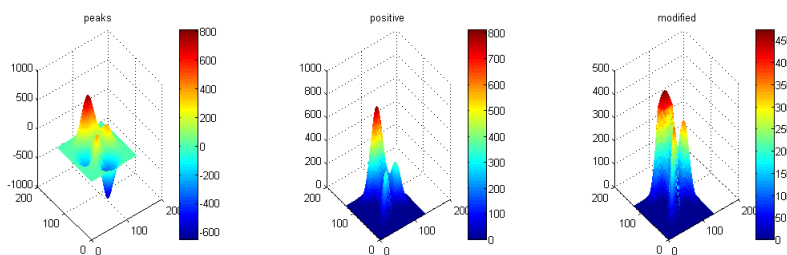


Фиг. 19. (а) Кохерентна карта, (б) Интерферограма.

3.3. Квази SAR интерферограми и диферентни интерферограми с ефективна подпикселна крос-корелационна корегистрация на изображенията

3.3.1. Моделиране на земна повърхност и последвала деформация на района. Съхраняване на данните в GEO TIFF файлове

Разглежда се повърхност със сложен релеф, описана с израз (3) и представена на Фиг. 20, а. За моделиране на деформация на релефа се извличат само положителни стойности (Фиг. 20, б), въвежда се деформация (Фиг. 20, в) чрез следните операции: намерена е средната височина на повърхността; съставена е бинарна индексна матрица, съдържаща стойност единица само в онези индекси от повърхността, които са по-високи от намерената средна височина; деформацията е извършена посредством 20% редукция на височините, които са над средната и са извадени от изходната повърхнина, като се използва бинарната матрица.



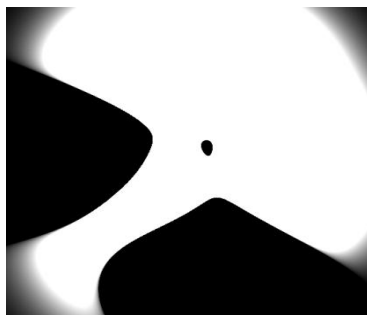
Фиг. 20. (а) Земна повърхност, (б) положителни стойности, (в) деформация.

Така описаните операции са извършени с помощта на следния програмен фрагмент:

```
surface_middle = max(max(surface)) / 2;
index = (surface > surface_middle);
elevation = (index .* surface) ./ 1.2;
deformation = surface - elevation + ((index .* surface_middle)/1.2);
```

И трите моделирани земни повърхности: първоначалната, тази с положителни стойности и деформираната земни повърхности са записани в GEO TIFF файл

посредством функция *geotiffwrite*, представена в източници [125], [134]. Тестовите райони са генерирани, като повърхности от 512 и 1024 точки и имат следния общ вид показан на Фиг. 21.



Фиг. 21. Общ вид на GEO TIFF файл.

3.3.2. Симулация на сателитна интерферометрична система, използваща радио локационна станция със синтезирана апертура

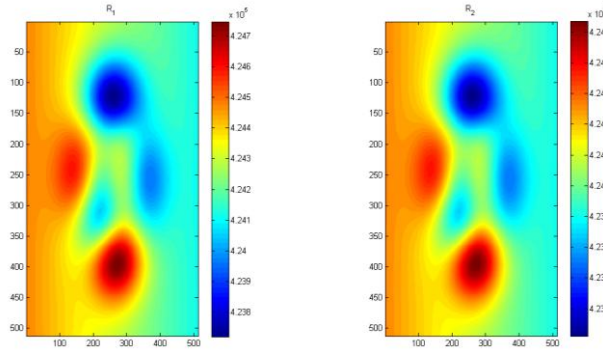
Повърхнината се наблюдава със SAR сателитна система, разположена на два космически носители с параметри на траекторията в момент на получаване на изображението, както следва координати на първия сателит: $S_{1x0} = 0$ m, $S_{1y0} = 3 \cdot 10^5$ m, $S_{1z0} = 3 \cdot 10^5$ m, координати на втория сателит: $S_{2x0} = 0$ m, $S_{2y0} = 3.3 \cdot 10^5$ m, $S_{2z0} = 3 \cdot 10^3$ m, базова линия между сателитите: $B = 300$ m. Основна информативна компонента за определяне на фазите в двата комплексни образа са разстоянията от сателитите до всеки пиксел от изображението.

Разстоянията от двата спътника до всяка точка от изследваната земна повърхност се определят от изразите:

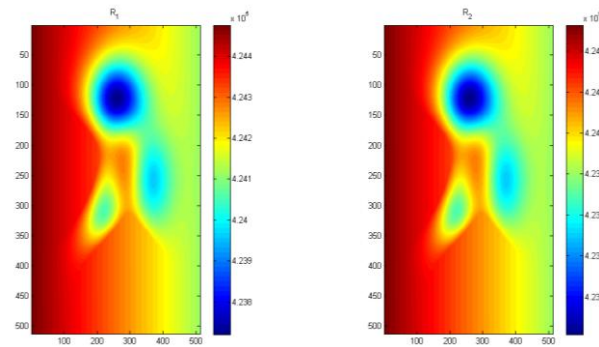
$$(48) \quad \begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(S_{1x} - X)^2 + (S_{1y} - Y)^2 + (S_{1z} - Z)^2} \\ R_2 &= \sqrt{(S_{2x} - X)^2 + (S_{2y} - Y)^2 + (S_{2z} - Z)^2}, \end{aligned}$$

където X, Y, Z са координатни матрици, описващи изследваната повърхност.

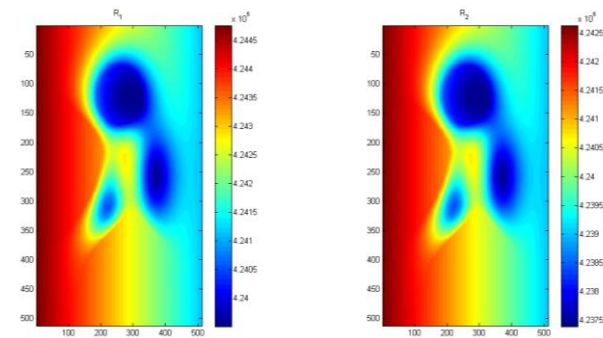
Графичното описание в *pseudo color map* на разстоянията R_1 и R_2 от сателитите до трита типа повърхности (*повърхността само с положителни стойности и деформираната повърхност с положителни стойности*) са представени съответно на Фиг. 22, 23 и 24.



Фиг. 22. Разстояния до първоначалната повърхност.



Фиг. 23. Разстояния до повърхността с положителни стойности.



Фиг. 24. Разстояния до деформираната повърхност с положителни стойности.

Интерферентната фазова разлика за всеки пиксел от трите изследвани повърхности се изчислява от израза:

$$(49) \quad P_{wrapped} = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1), \text{ където } \lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{f} \text{ m, } f = 3 \cdot 10^9 \text{ Hz}.$$

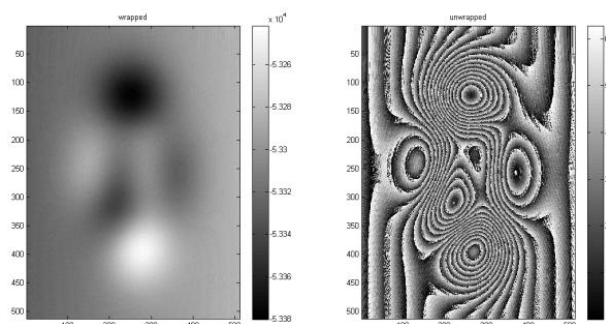
Операция по намиране на разгънатата фаза (още така наречената *разстелена фаза*) се определя от израза:

$$(50) \quad P_{unwrapped} = P_{wrapped} - 2\pi(\max(K)),$$

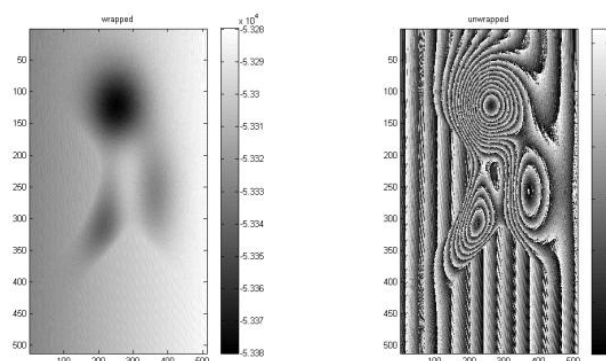
където K е цялата част на израза:

$$(51) \quad K = \left\lceil \frac{2}{\lambda} (R_2 - R_1) \right\rceil.$$

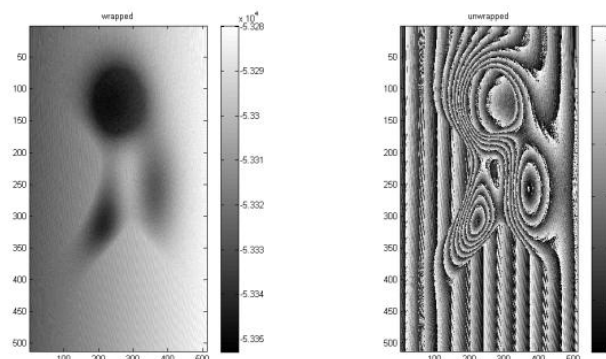
Квази SAR интерферограми със свити фази (*интерферометричните кръгове*) и разстелените фази, съответстващи на релефа на трите повърхнини (*първоначално моделираната повърхност, повърхността само с положителни стойности и деформираната повърхност с положителни стойности*), са представени, съответно на Фиг. 25, 26 и 27.



Фиг. 25. Квази интерферограма до първоначалната повърхност.



Фиг. 26. Квази интерферограма до повърхността с положителни стойности.



Фиг. 27. Квази интерферограма до деформираната повърхност с положителни стойности.

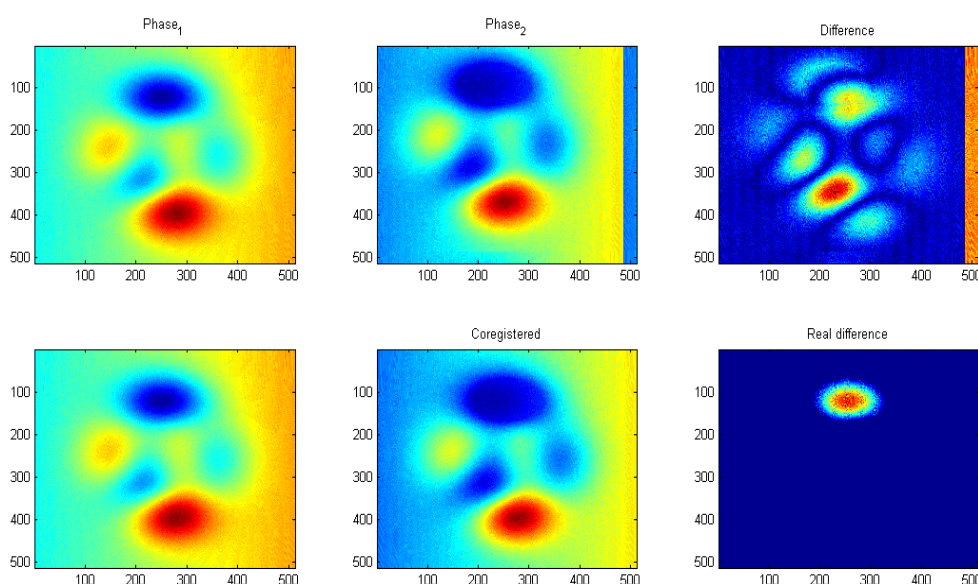
3.3.3. Въвеждане на отместване във разстоянията до всеки пиксел на едно от квази SAR изображение

С цел илюстрация на процеса на корегистрация на двата SAR образа, се въвежда преднамерено отместване в разстоянията до всеки пиксел, както следва 5% нагоре и 5% наляво посредством следния програмен фрагмент в среда MATLAB:

```
s = size(img);  
shift = 0.05; % relative shift by percent of the image  
img = img(:,mod(round((1:s(2))+ s(2)*shift), s(2))+1,:); % Left/right  
img = img(mod(round((1:s(1))+ s(1)*shift), s(1))+1,:,:); % Up/Down
```

3.3.4. Корегистрация и квази SAR диферентна интерферограма

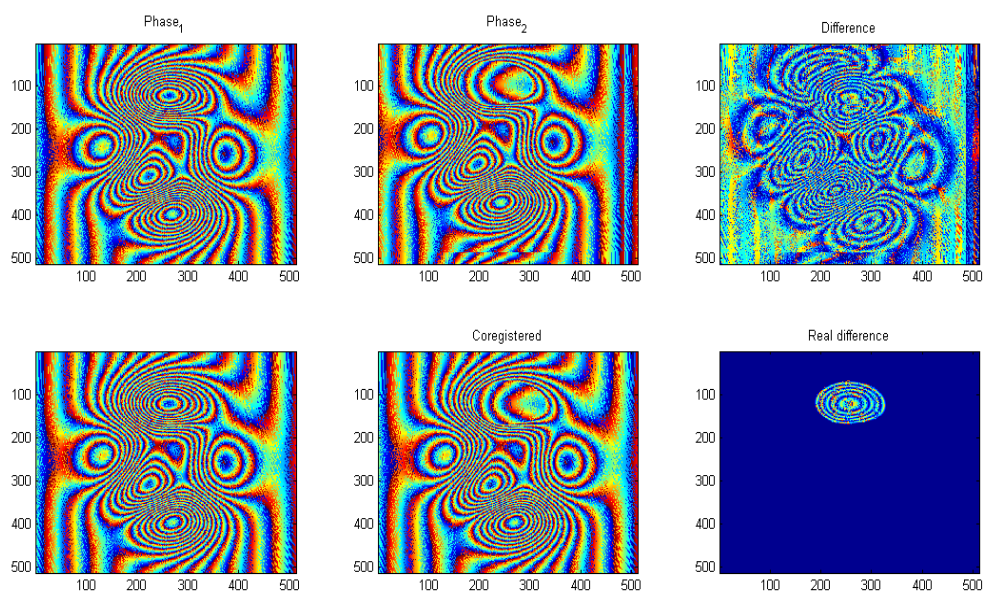
Прилага се алгоритъм за ефективна подпикселна корегистрация на изображенията посредством крос-корелационна процедура, посочен в източник [126], [127], [132] и [133]. Резултатът е показан на Фиг. 28 и Фиг. 29. Алгоритъм за корегистрация на две изображения, главно и подчинено, е представен математически с изразите (35) и (42). Генерираната квази SAR интерферограма, демонстрираща изменението в релефа след настъпилата деформация, е показан на Фиг.30 и Фиг.31.



Фиг. 28. Разстелени фази и тяхната диферентна.

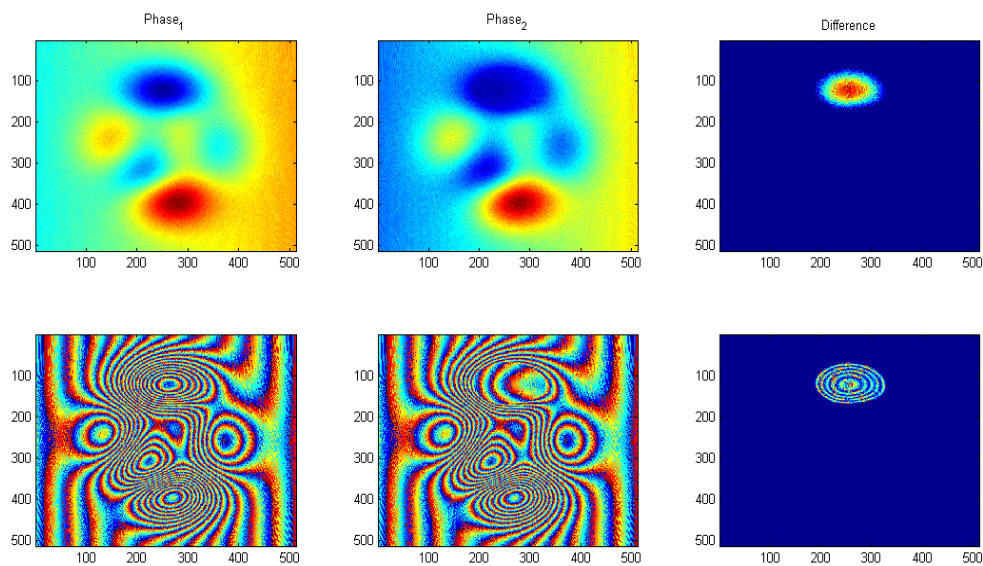
На Фиг.28 са показани разстелени фази в следната последователност: на първия ред вдясно е представена свитата фаза на първоначалната повърхност. Изображението в средата е свитата фаза на деформираната повърхност изместена с 5% вляво и 5% нагоре. В този случай диферентната фаза, показана на първи ред в дясно не е еднозначна. На втория ред в средата същото изображение на фазата на деформираната повърхност е корегистрирано и както може да се забележи долу вдясно, резултатната диферентна фаза показва ясно извършената деформация.

На Фиг.29 изображенията са идентично разположени, като в този случай разликата спрямо Фиг.28 е, че са представени свити фази на изследваните повърхности.



Фиг. 29. Свити фази и тяхната диферентната.

Общо представяне на сгънатите и разстелените фази на изследваните повърхности и техните диферентни фази са показани на Фиг. 30.



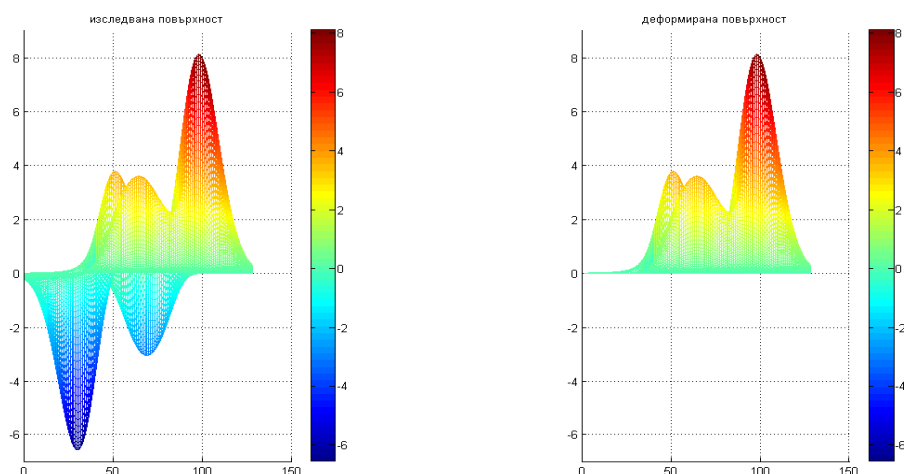
Фиг. 30. Сгънати и разстелени фази и техните диферентни.

3.4. SAR интерферограми и диферентни интерферограми - числени експерименти

3.4.1. SAR интерферограми и диферентни интерферограми при различни базови линии

Изследва се влиянието на различни базови линии върху качеството на интерферограмите и диферентните интерферограми. За моделиране на земната повърхност е използвана стандартната функция *peaks* в програмна среда MATLAB®. Математическо представяне на функцията се дава от израз (3). Зададеният тримерен релеф с повърхнината z_{mn} е представен като квадратна матрица. Стойностите на елементите на матрицата са височините на разделителните елементи (*пикселите*) в тримерната координатна равнина $Oxyz$ на SAR сценария (Фиг.6).

За целите на експеримента зададеният тримерен релеф е деформиран като са извлечени само положителните стойности от първоначалната повърхност, т.е. деформацията е извършена посредством премахване на отрицателните стойности (Фиг.31, а и 31, б).



Фиг. 31. (а) Земна повърхност, (б) положителни стойности на релефа.

Повърхнината се наблюдава със SAR система, разположена на три сателитни носителя със зададени параметри на InSAR сценария, както следва (Табл.5):

	SAR1	SAR2	SAR3
X1, m	200	200	200
Y1, m	1000	1010	1020
Z1, m	200000	200000	200000
Np	512	512	512
Nk	512	512	512
m_n	128	128	128
delta	4	4	4
V, m/s	2000	2000	2000
Тp, s	0.8	0.8	0.8
Tk, s	0.02	0.02	0.02
F, GHz	10	10	10
Deltaf, MHz	200	200	200

Табл. 5. Параметри на сателитните радиолокационни системи

Тук $X1$, $Y1$ и $Z1$ са координатите на сателитните радиолокационни системи, Np е броя на сондиращите импулси, Nk е чувствителността по K , m_n е дименсията на изследваната повърхност, δ е разстояние между точките на повърхността, V е скоростта на сателитния носител, Tr е периода на повторение на импулса (*Pulse repetition period*), Tk е линейно фазов параметър (*Linear phase parameter*), f е носеща честота на сигнала, δf е честотна лента.

Както може да се види от Табл.5, всички параметри на трите сателитни радиолокационни системи са почти идентични, като има разлика единствено в разстоянието им една от друга – базовата линия. Базовата линия между SAR1 и SAR2 е 10 метра, а между SAR1 и SAR3 е 20 метра.

Алгоритъм за възстановяване на комплексното изображение от SAR сигнал

Извършва се демодулация на SAR сигнала чрез умножение на всяка колона на двумерната матрица $S(k, p)$ с комплексно спрегнатия излъчен сигнал, израз (14).

Възстановява се комплексното изображение чрез двукратно бързо преобразование на Фурие, изрази (12) и (13).

Двумерната матрица $\dot{S}(\bar{k}, \bar{p})$ е търсения комплексен образ на наблюдаваната повърхност, съдържащ: амплитудна и фазова информация за всеки пиксел от изображението.

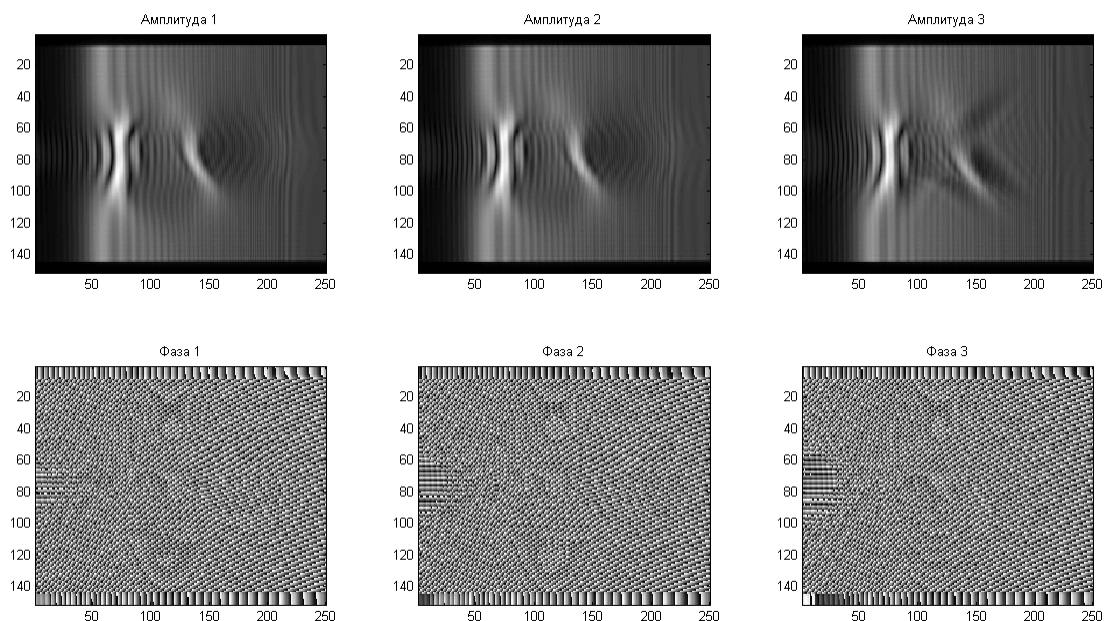
Програмният фрагмент в среда MATLAB на алгоритъма за възстановяване на комплексното изображение от SAR сигнал е даден в Табл.6.

<pre>% Възстановяване на образа чрез бързо преобразование на Фурие slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc))));</pre>
--

Табл. 6. Възстановяване на образа чрез бързо преобразование на Фурие.

За целите на интерферометричната диференциална обработка на комплексните изображения е необходима корегистрация. Използван е алгоритъм за ефективна под-пикселна регистрация на изображенията посредством крос-корелационна процедура, посочен в източници [126], [127], [132] и [133] и математически е описан с изрази от (35) до (42). Корегистрационната процедура се реализира като второто и третото комплексно изображения са корегистрирани спрямо първото. В случая първото комплексно изображение играе ролята на главно, а второто и третото са подчинени.

На Фиг.32 са илюстрирани амплитудите и фазите на комплексните трите SAR изображения след възстановяването на образа и тяхната съвместна корегистрация.



Фиг. 32. Визуализация на получените комплексни сигнали: амплитуда и фаза.

Изчисляване на интерферограми и диферентни интерферограми

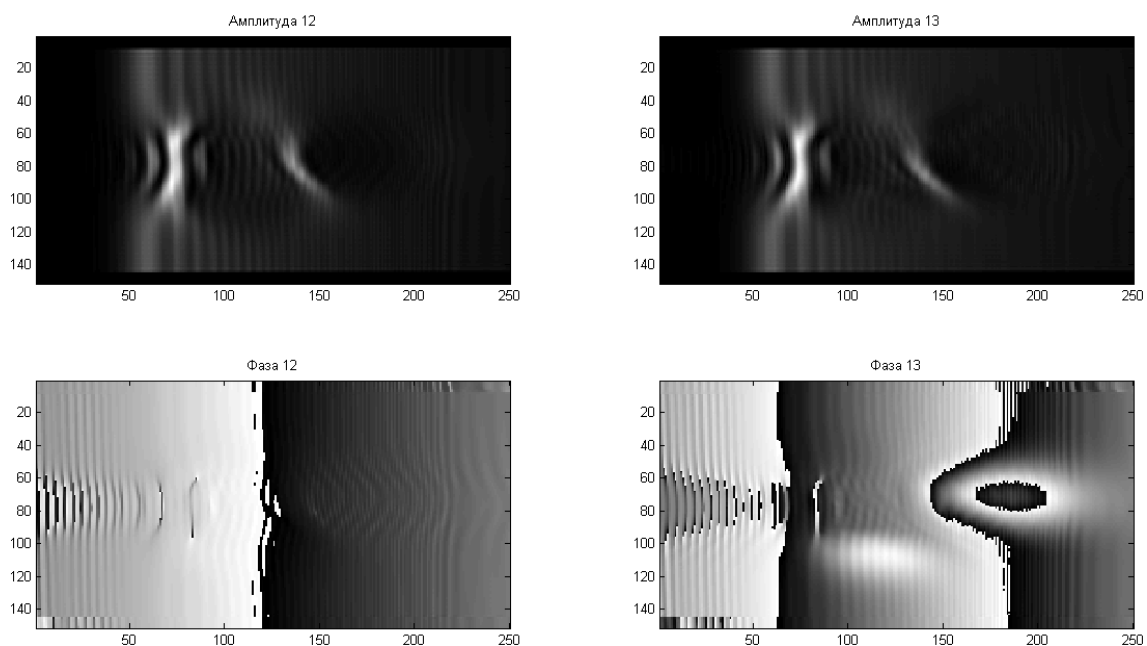
Интерферограмата се изчислява с израз (30), а диферентната интерферограма с изрази (33) и (34). Изчислителният процес включва намирането на комплексните интерферограми от две комплексни изображения. В цифровия експеримент са комбинирани първо и второ комплексни изображения, както и първо и трето комплексни изображения. Двете комплексни интерферограми се получават от комплексно спрегнато умножение на участващите изображения.

Програмният фрагмент за изчисляване на комплексните интерферограми и извличането на амплитудна (кохерентност) и фазова (интерферограма) информация от тях, разработен в среда MATLAB е представен в Табл. 7. Фиг.33 и Фиг.34 визуализират амплитудата (кохерентната карта) и фаза (интерферограма) на двете комплексни интерферограми, наименувани за краткост 12 и 13.

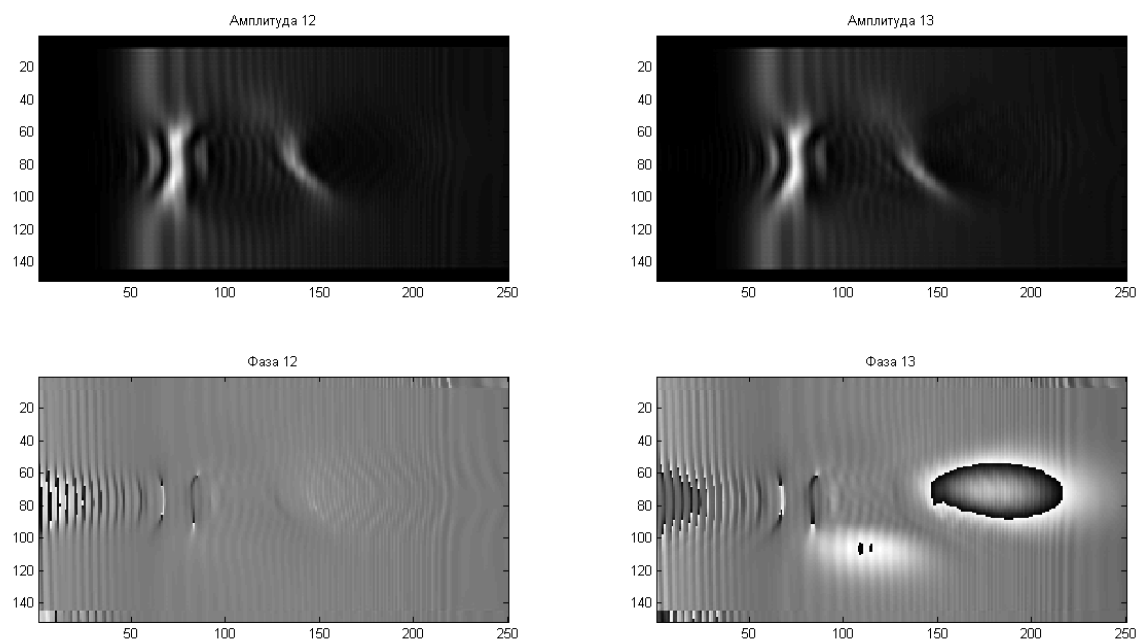
```
%% Получаване на кохерентна карта и интерферограма
% В тази част от програмния фрагмент се изчислява комплексното изображение, извличат се
кохерентна карта и интерферограма и се визуализират.
% Изчисляване на комплексното изображение
I12 = slc1 .* conj( slc2 );
I13 = slc1 .* conj( slc3 );
% Извличане на кохерентната карта и интерферограмата
I12A = abs(I12);
I12P = angle(I12);
I13A = abs(I13);
I13P = angle(I13);
% Визуализация на кохерентната карта и интерферограмата
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(gray)
subplot(2,2,1), imagesc(I12A), title('Амплитуда 12');
subplot(2,2,2), imagesc(I13A), title('Амплитуда 13');
subplot(2,2,3), imagesc(I12P), title('Фаза 12');
```

```
subplot(2,2,4), imagesc(I13P), title('Фаза 13');
```

Табл. 7. Програмен фрагмент за изчисляване на комплексните интерферограми.

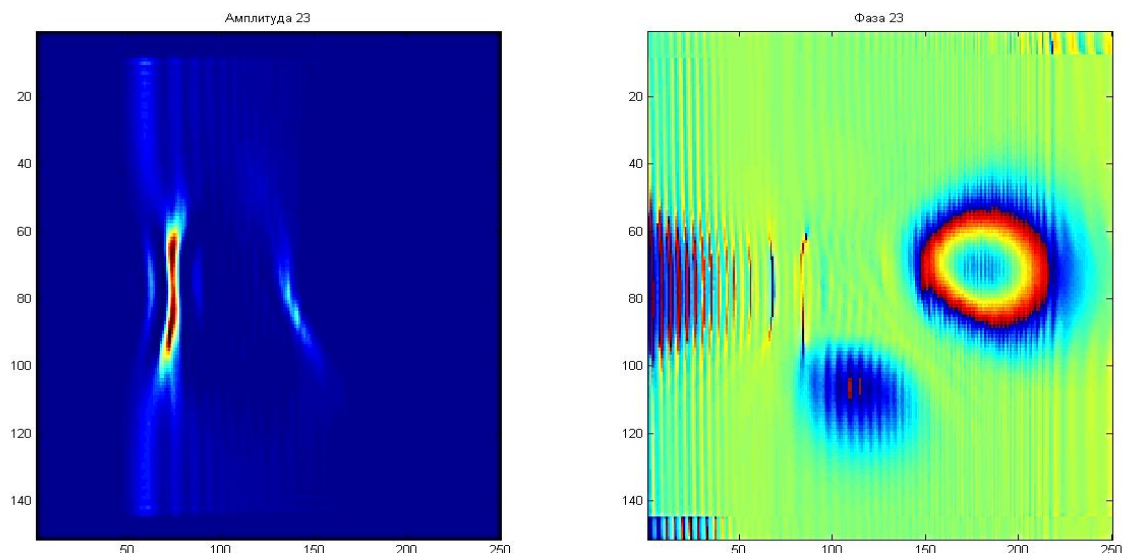


Фиг. 33. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения преди ефективна подпикселна корегистрационна процедура.



Фиг. 34. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения след ефективна подпикселна корегистрационна процедура.

Аналогично за получаване на диферентна интерферограма се изчислява комплексно спрегнато умножение на двете интерферограми, които са резултат от предходната операция. Диферентна интерферограма демонстрира изменението в релефа след настъпилата деформация. Амплитудата и фазата на комплексната диферентната интерферограма са представени на Фиг.35.



Фиг. 35. Амплитуда и фаза извлечени от комплексната диферентна интерферограма.

Изследване на влиянието на базовата линия върху SAR интерферограмите и диферентните интерферограми

Формират се три комплексни изображения, две комплексни интерферограми и една диферентна комплексна интерферограма. В Табл.8 са представени амплитудите и фазите на трите комплексни изображения при различни базови линии (1, 10, 100, 1000 метра). В Табл.9 са представени амплитудите и фазите на трите интерферометрични комплексни изображения при различни базови линии (1, 10, 100, 1000 метра) преди ефективна подпикселна корегистрационна процедура. В Табл.10 са представени амплитудите и фазите на трите интерферометрични комплексни изображения при различни базови линии (1, 10, 100, 1000 метра) след ефективна подпикселна корегистрационна процедура. В Табл.11 са представени амплитудите и фазите на трите диферентни интерферограми при различни базови линии (1, 10, 100, 1000 метра).

Базови линии	Амплитуди и фази
--------------	------------------

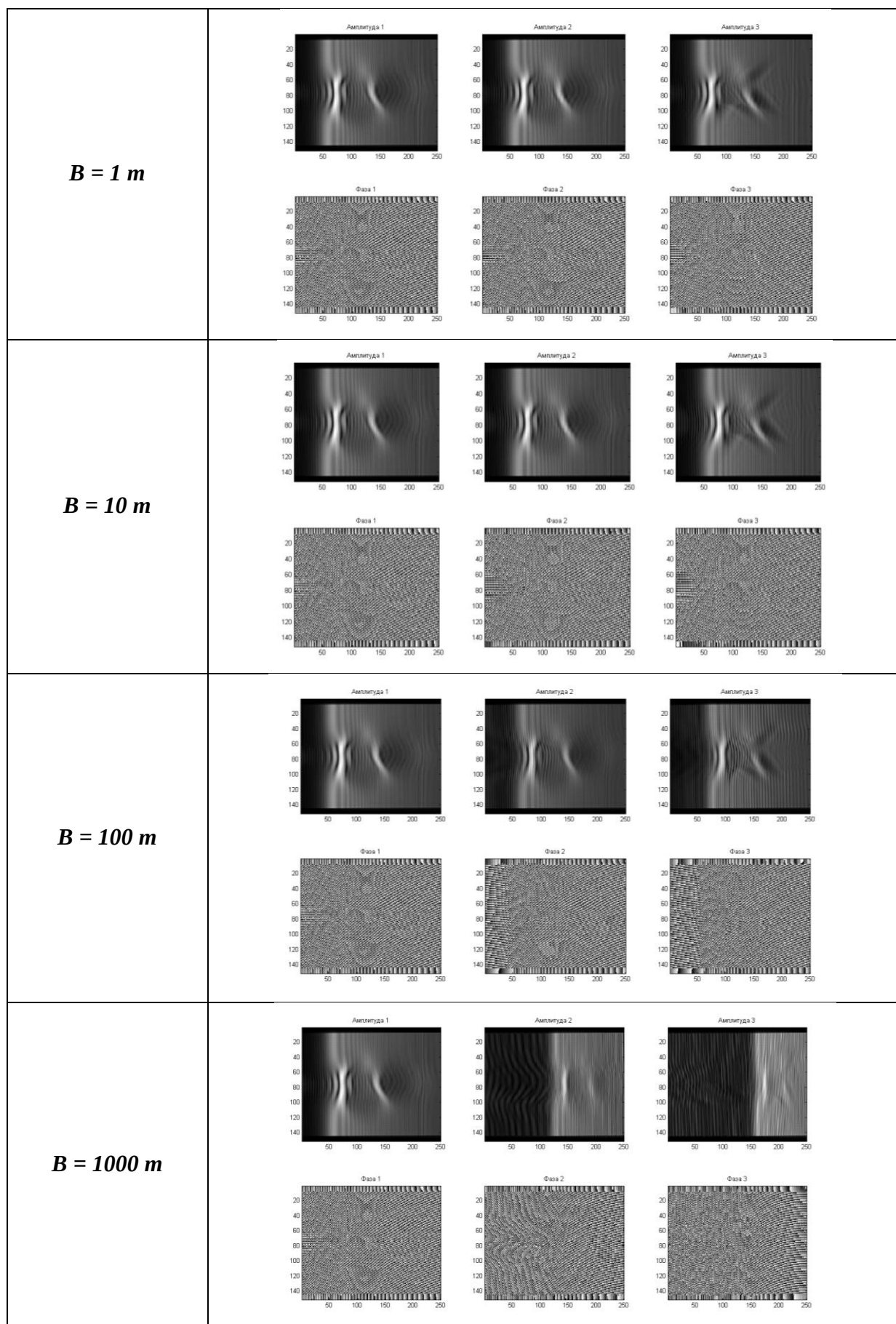
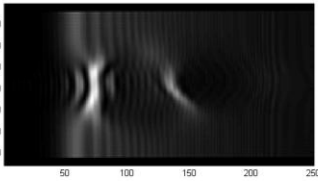
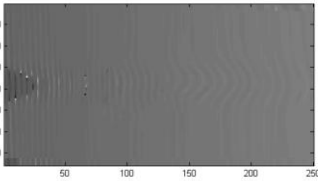
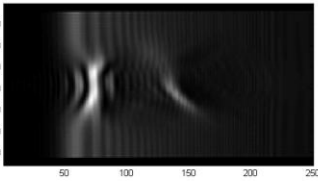
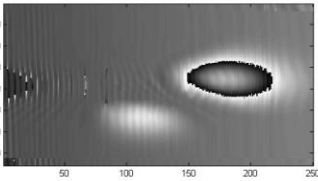
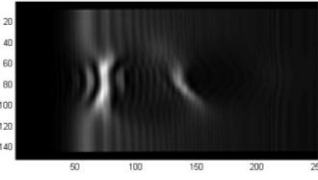
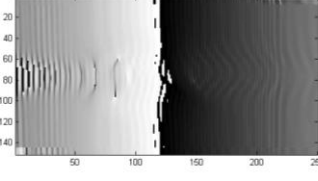
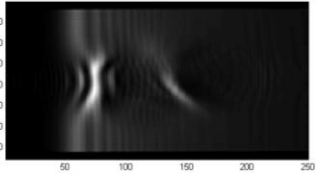
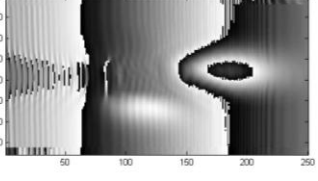
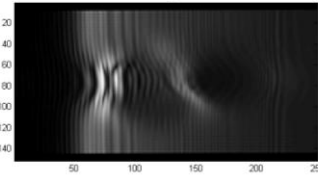
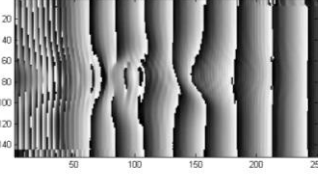
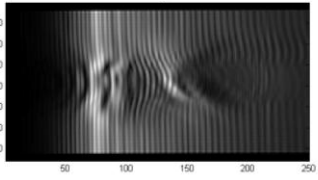
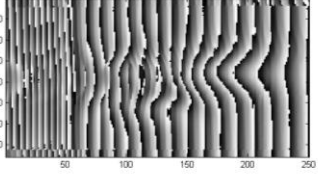


Табл. 8. Амплитуда и фаза на трите комплексни изображения при различни базови линии.

Базови линии	Амплитуди и фази			
$B = 1\text{ m}$	Амплитуда 12  Фаза 12 		Амплитуда 13  Фаза 13 	
$B = 10\text{ m}$	Амплитуда 12  Фаза 12 		Амплитуда 13  Фаза 13 	
$B = 100\text{ m}$	Амплитуда 12  Фаза 12 		Амплитуда 13  Фаза 13 	

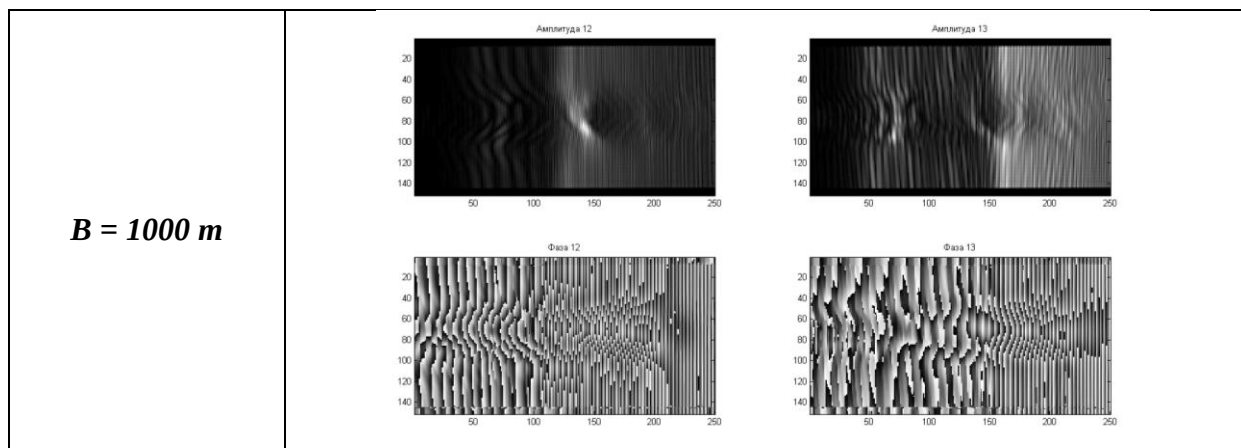
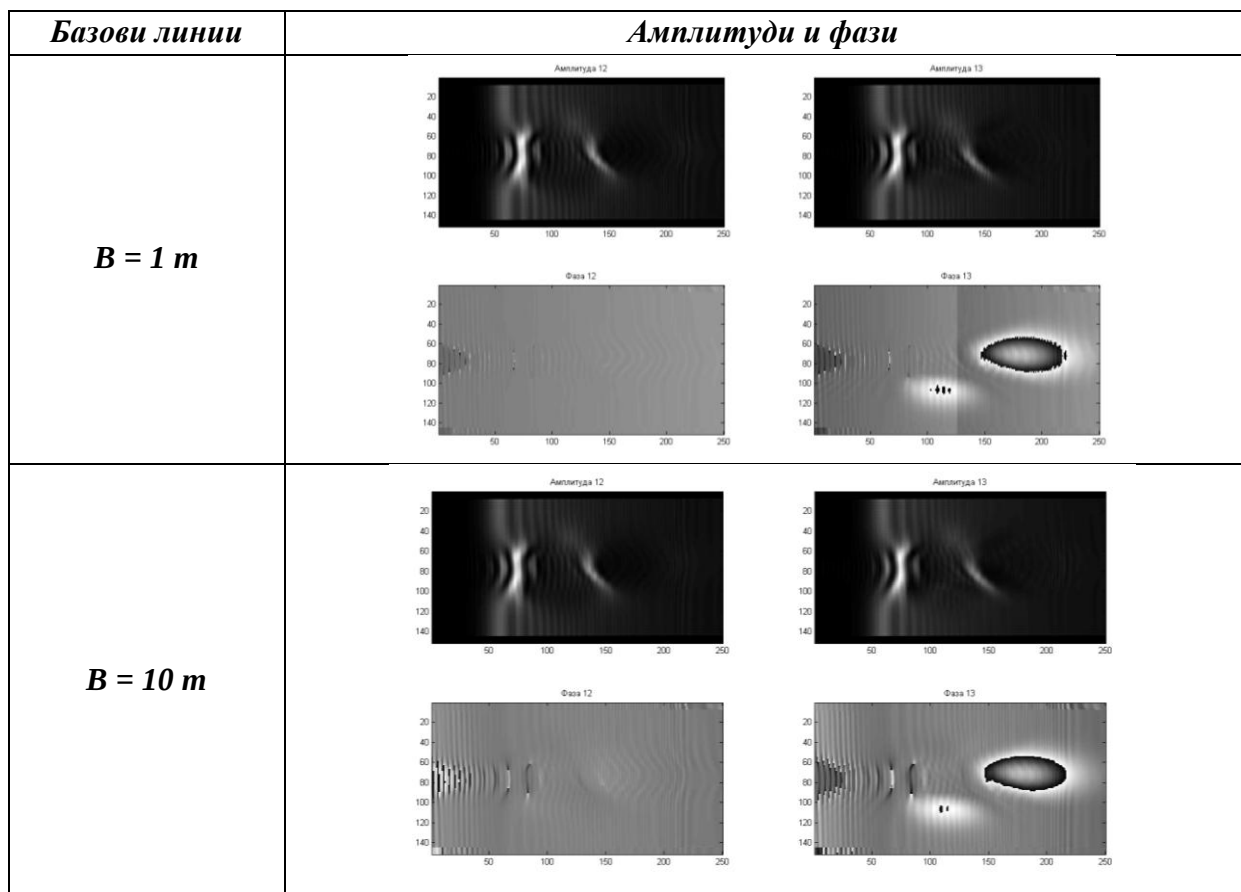


Табл. 9. Амплитуда и фаза на трите интерферометрични комплексни изображения при различни базови линии преди ефективна подпикселна корегистрационна процедура.



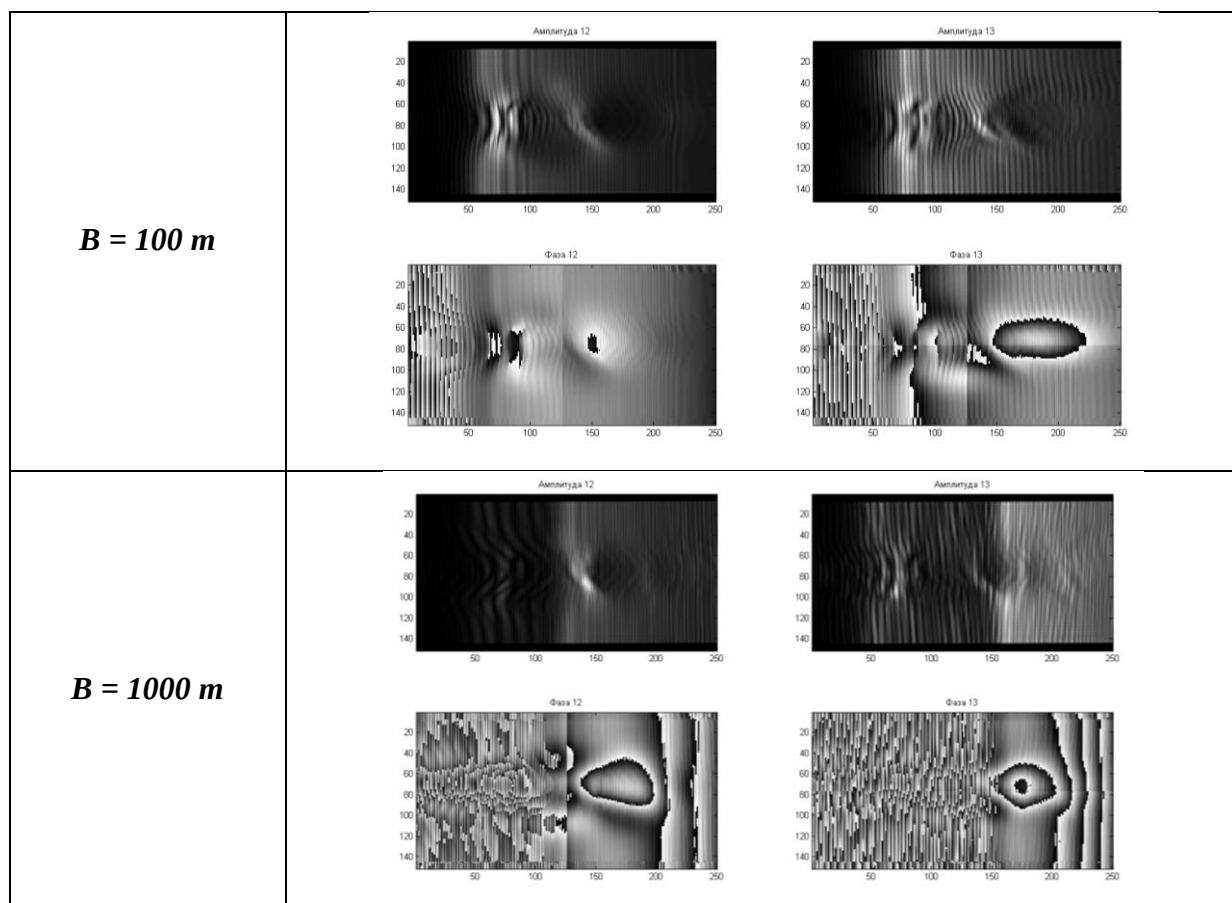
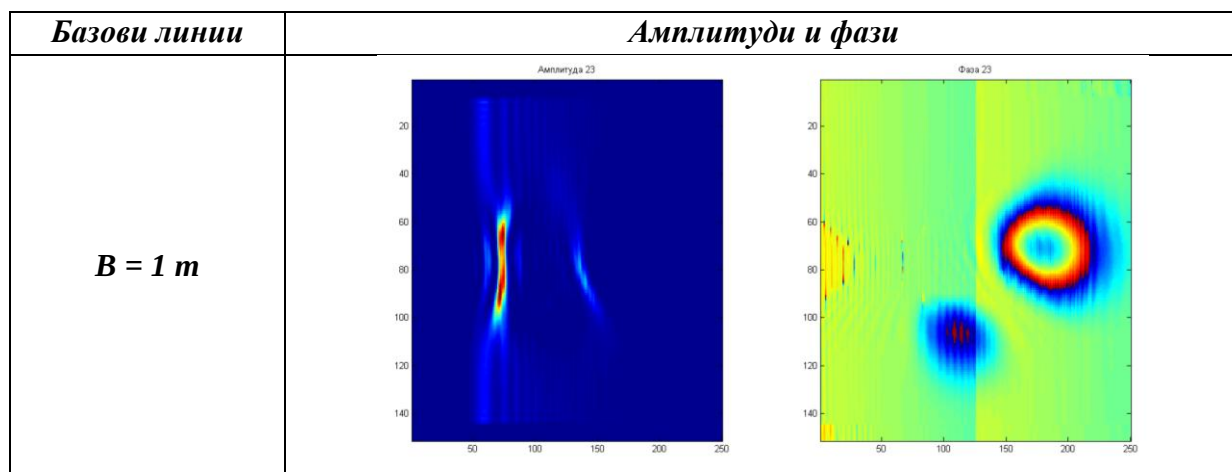


Табл. 10. Амплитуда и фаза на трите интерферометрични комплексни изображения при различни базови линии след ефективна подпикселна корегистрационна процедура.



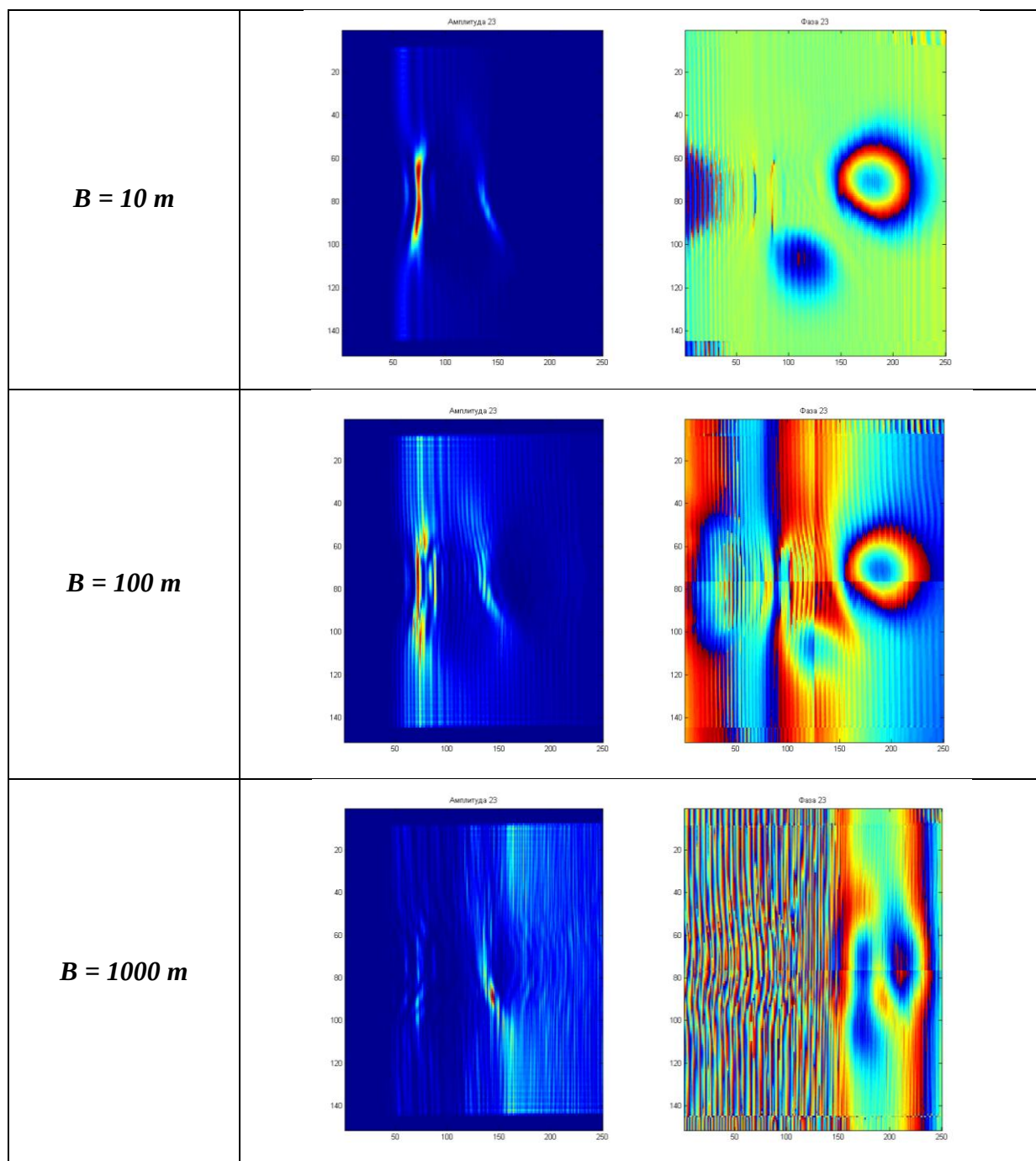


Табл. 11. Амплитуда и фаза на трите диферентни интерферограми при различни базови линии.

В Табл. 12 са представени времената за изпълнение на алгоритъма при формирането на сигнала и генериране на трите комплексни изображения, при различните базови линии, съответно: 1, 10, 100 и 1000 метра.

Базови линии	Корегистрация
$B = 1 \text{ m}$	Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 8057.826567 seconds. Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 9061.457467 seconds. Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 7643.542772 seconds.

B = 10 m	Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 12969.612388 seconds. Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 12389.666395 seconds. Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 12719.458267 seconds.
B = 100 m	Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 7617.324193 seconds. Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 8046.198936 seconds. Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 7456.949189 seconds.
B = 1000 m	Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 8406.282645 seconds. Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 8678.024004 seconds. Генериране на комплексно изображение Elapsed time is 7734.427218 seconds.

Табл. 12. Времена за изпълнение на алгоритъма.

В Табл. 13 са представени времената за изпълнение на ефективната подпикселна корегистрационна процедура, както и информация за изместванията на изображенията по редове и колони при тяхната корегистрация.

Базови линии	Корегистрация
B = 1 m	Генериране на диферентна интерферограма посредством метода "3-pass-interferometry" Translation invariant normalized RMS error between images: 0.149699 Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-negative): -0.324443 Pixel rows shifts between images: 0 Pixel cols shifts between images: 0 Translation invariant normalized RMS error between images: 0.583119 Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-negative): -0.514834 Pixel rows shifts between images: 0 Pixel cols shifts between images: 0.1 Elapsed time is 2.530170 seconds.
B = 10 m	Генериране на диферентна интерферограма посредством метода "3-pass-interferometry" Translation invariant normalized RMS error between images: 0.197184 Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-negative): 0.0932771 Pixel rows shifts between images: 0 Pixel cols shifts between images: -1 Translation invariant normalized RMS error between images: 0.596862 Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-negative): 0.284445 Pixel rows shifts between images: 0 Pixel cols shifts between images: -2 Elapsed time is 2.344026 seconds.
B = 100 m	Генериране на диферентна интерферограма посредством метода "3-pass-interferometry" Translation invariant normalized RMS error between images: 0.871513

	<i>Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-negative): 1.03886</i> <i>Pixel rows shifts between images: 0</i> <i>Pixel cols shifts between images: -9.9</i> <i>Translation invariant normalized RMS error between images: 0.956405</i> <i>Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-negative): -2.04896</i> <i>Pixel rows shifts between images: 0.1</i> <i>Pixel cols shifts between images: -17.7</i> <i>Elapsed time is 2.533322 seconds.</i>
B = 1000 m	<i>Генериране на диферентна интерферограма посредством метода "3-pass-interferometry"</i> <i>Translation invariant normalized RMS error between images: 0.987959</i> <i>Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-negative): 2.1298</i> <i>Pixel rows shifts between images: 0</i> <i>Pixel cols shifts between images: -94.5</i> <i>Translation invariant normalized RMS error between images: 0.993778</i> <i>Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-negative): 2.46027</i> <i>Pixel rows shifts between images: -0.1</i> <i>Pixel cols shifts between images: 65.3</i> <i>Elapsed time is 2.426012 seconds.</i>

Табл. 13. Ефективна подпикселна корегистрационна процедура.

Посочените в Табл.12 и Табл.13 времена за изпълнение на алгоритъма са зависими от апаратната и програмната част на съответната компютърна система. В случая проведените цифрови експерименти са извършени с апаратна и програмна част представена в Табл. 14. Използван е лаптоп марка Acer модел *Aspire* номер 5755G.

CPU	<i>Intel® Core™ i5-2410M 2,3GHz</i>
RAM	<i>5 GB DDR3</i>
VIDEO	<i>NVIDIA® GeForce® GT 540M, 2 GB VRAM</i>
HDD	<i>1 TB</i>
OS	<i>Microsoft® Windows® 7 Professional 64 bit + SPI</i>
MATLAB	<i>MATLAB® R2010b Version 7.11.0.584 64 bit</i>

Табл. 14. Апаратна и програмна част.

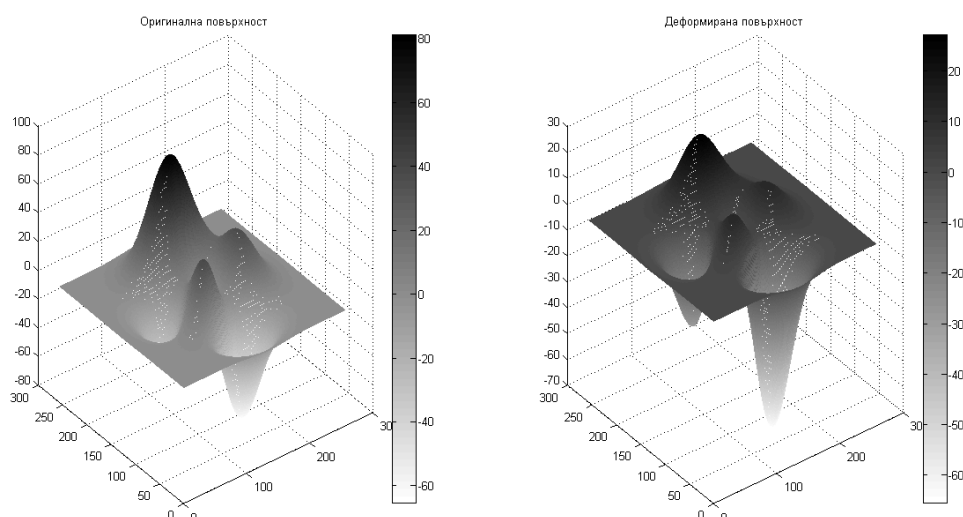
Изводи

В резултат на анализа на получените резултати при различни базови линии, могат да се направят следните изводи. При малки базови линии се получават слабо изразени комплексни интерферограмни изображения, но висококачествени диферентни интерферограми. Такъв е случаят при базови линии от 1 метър и 10 метра. При големи базови линии се получават ясно изразени „интерферометрични кръгове“ във фазовите картини на комплексните интерферометрични изображения, но има загуба на кохерентност при диферентни интерферограми, породена от преминаването на критичната базова линия за изследвания район. Такъв е случаят с базови линии 100 метра и особено осезаем е ефекта при базова линия от 1000 метра в показаните фигури. Експерименталната част е силно възпрепятствана от мощността на наличната хардуерна конфигурация.

3.4.2. Оценка на деформацията на земната повърхност, чрез SAR диферентна интерферограма

Моделира се процесът на получаване на комплексни SAR сигнали, отразени от сложна повърхност без деформация и с деформация, като и синтезът на комплексни SAR интерферограми и диферентни интерферограми при високоскоростни алгоритми на изчислителния процес. Отново за моделиране на земната повърхност е използвана стандартната функция *peaks* в програмната среда MATLAB®, израз (3). Зададеният тримерен релеф с повърхнина z_{mn} е представен като квадратна матрица. Стойностите на елементите на матрицата са височините на разделителните елементи (*пиксели*) в тримерната координатна равнина $Oxyz$ на SAR сценария (Фиг.6).

За целите на експеримента, зададеният тримерен релеф е деформиран като са редуцирани положителните стойности от първоначалната повърхност, т.е. деформацията е извършена посредством намаляване на височинната стойност на релефа с $2/3$, както е показано на Фиг. 36, а и Фиг.36, б.



Фиг. 36. (а) Наблюдавана повърхност, (б) деформирана повърхност.

Повърхнината се наблюдава със SAR система, разположена на три сателитни носителя със зададени параметри на InSAR сценария, както следва (Табл. 15):

	SAR1	SAR2	SAR3
X1, km	350	351,5	350,0
Y1, km	350	350,0	351,2
Z1, km	800	800	800
Np	512	512	512
Nk	512	512	512
m_n	256	256	256
delta	2	2	2
V, m/s	1000	1000	1000
Tp, s	0.025	0.025	0.025
Tk, s	0.0025	0.0025	0.0025
F, GHz	10	10	10
detaf, MHz	150	150	150

Табл. 15. Параметри на сателитните радиолокационни системи.

Където: $X1$, $Y1$ и $Z1$ са координатите на сателитните радиолокационни системи, Np е броя на сондиращите импулси, Nk е броят на дискретите по разстояние, равен на K , броят на дискретите на LFM импулс, m_n е дименсията на изследваната повърхност, δ е разстояние между точките на повърхността, V е скоростта на сателитния носител, T_p е периодът на повторение на импулса (*Pulse repetition period*), T_k е времевият размер на LFM дискрет, f е носеща честота на сигнала, δf е честотна лента.

Както може да се види в Табл.15, всички параметри на трите сателитните радиолокационни системи са почти идентични, като има разлика единствено в разстоянието им една от друга. Съответно базовата линия между SAR1 и SAR2 е 1500m, а между SAR1 и SAR3 е 1200 m.

Изчисляване на разстоянията

Необходимо е да се изчисли разстоянието от SAR до всеки доминиращ точков излъчвател от наблюдаваната повърхност за всеки дискретен момент p . Използва се функция за изчисляване на Евклидовите разстояния от SAR до повърхността, написана от Roland Bunschoten, University of Amsterdam, Intelligent Autonomous Systems (IAS) group, която е едно редова и има следния синтаксис

$$R = \text{distance}(a,b).$$

Повече информация за имплементацията на векторизираната функция за изчисляване на Евклидовите разстояния може да бъде открита в източник [135]. Всъщност тази функция изчислява Евклидовите разстояния посредством следния MATLAB® програмен фрагмент:

```
aa=sum(a.*a,1); bb=sum(b.*b,1); ab=a'*b;
R = sqrt(abs(repmat(aa',[1 size(bb,2)])) + repmat(bb,[size(aa,2) 1]) - 2*ab));
```

Сложността на алгоритъма при векторизирана функция за изчисляване на Евклидово разстояние е $O(1)$, като в конкретния цифров експеримент броят на сондиращите импулси е 512.

Време закъснение на импулсите и формиране на SAR сигналът

Времевият параметър на закъснение на сигнала T_{mn} за всеки доминиращ излъчвател p се изчислява с израза (9), където $c = 3 \cdot 10^8$ m/s е скоростта на светлината, коефициентът 2 отчита времето на разпространението на електромагнитната вълна от системата SAR до доминиращ точков излъчвател и обратно. Съставя се едномерен масив от всички t_{mn} стойности, аранжирани във възходящ ред. Определя се минималната t_{mn} стойност $t_{mn \min}$ за всеки излъчен импулс p . Изчислява се фазовата компонента на отразения сигнал, израз (15).

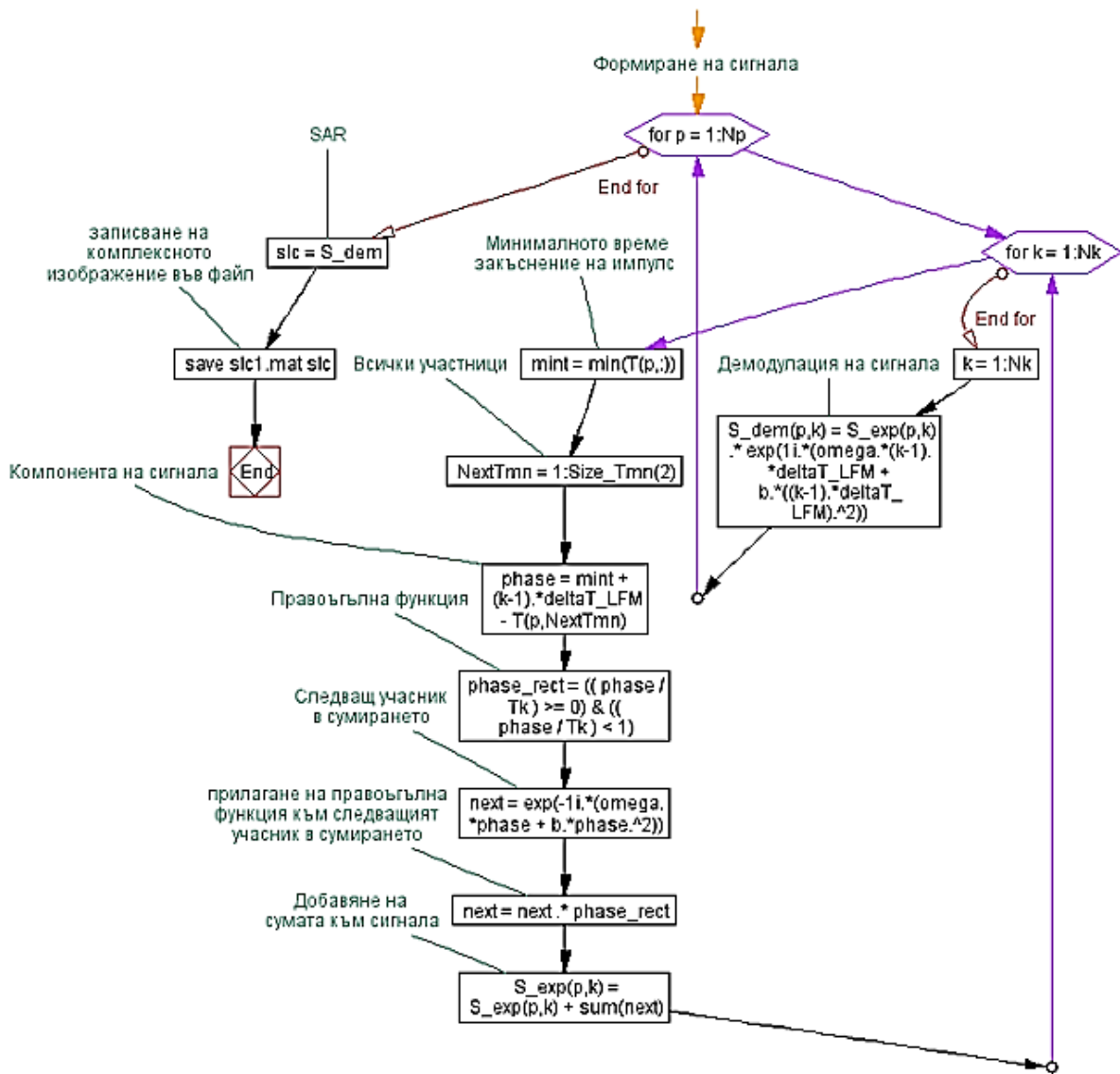
Крайната продължителност на отразения сигнал от всеки доминиращ излъчвател при формирането на сумарния SAR комплексен сигнал се отчита с правоъгълна функция. Селекцията на сигналите, отразени от отделните отражатели и участващи в сумарния комплексен SAR сигнал се извършва чрез поелементно матрично умножение (*матрично умножение на Адамар*) с правоъгълната матрична функция, израз (17).

Селектиращата правоъгълна функция е бинарна матрица, която съдържа стойност единица или нула, в зависимост от условието поставено по-горе. Поелементното умножение на матрицата на сигнала с матрицата, получена от правоъгълната функция, ще даде в резултат матрица, която съдържа само желаните стойности на SAR сигнала, отразен от mn -тия доминиращ точков излъчвател. Тогава при сумиране на отразените сигнали по дименсиите m и n , ще се получат стойностите на търсения комплексен SAR сигнал, S_{exp} , записани като елементи на двумерна матрица с адреси $[p, k]$, израз (19).

Реализацията в програмна среда MATLAB на посочения алгоритъм за изчисляване на време закъснението на импулсите и формирането на комплексния SAR сигнал е представен в Табл. 16. Блок схема на алгоритъма за формиране на SAR сигнал е представена на Фиг.37.

1	% Формиране на сигнала
2	for p = 1:Np
3	for k = 1:Nk
4	% Минималното време закъснение на импулс
5	mint = min(T(p,:));
6	% Всички участници
7	NextTmn = 1:Size_Tmn(2);
8	% Компонента на сигнала
9	phase = mint + (k-1).*deltaT_LFM - T(p,NextTmn);
10	% Правоъгълна функция
11	phase_rect = ((phase / Tk) >= 0) & ((phase / Tk) < 1);
12	% Следващ участник в сумирането
13	next = exp(-1i.*(omega.*phase + b.*phase.^2));
14	% прилагане на правоъгълна функция към следващият участник в сумирането
15	next = next .* phase_rect;
16	% Добавяне на сумата към сигнала
17	S_exp(p,k) = S_exp(p,k) + sum(next);
18	end
19	k = 1:Nk;
20	% Демодулация на сигнала
21	S_dem(p,k) = S_exp(p,k) .* exp(1i.*(omega.*(k-1).*deltaT_LFM + b.*((k-1).*deltaT_LFM).^2));
22	End

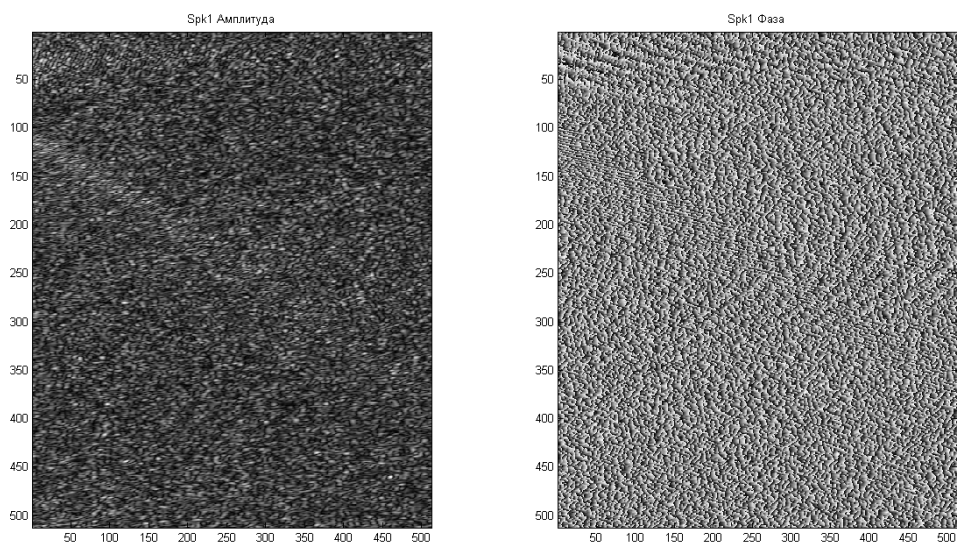
Табл. 16. Формиране на SAR сигнал.



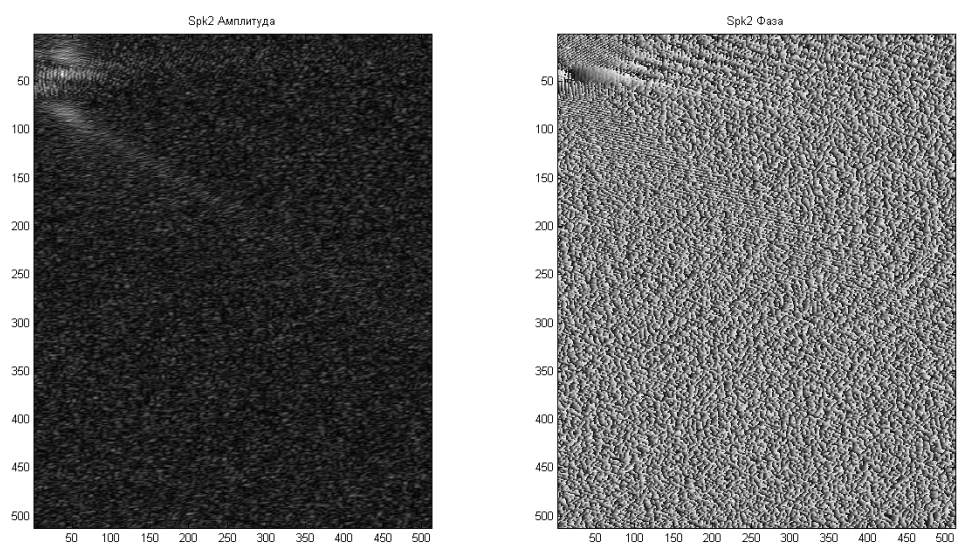
Фиг. 37. Блок схема на формиране на SAR сигнал.

Резултатната матрица S_{exp} , чрез която се формира комплексно изображение, съдържаща амплитудна и фазова информация се изчислява за всяка една от трите сателитни радиолокационни системи и се съхранява във файлове за по-нататъшна обработка, както следва: *slc1.mat*, *slc2.mat* и *slc3.mat*.

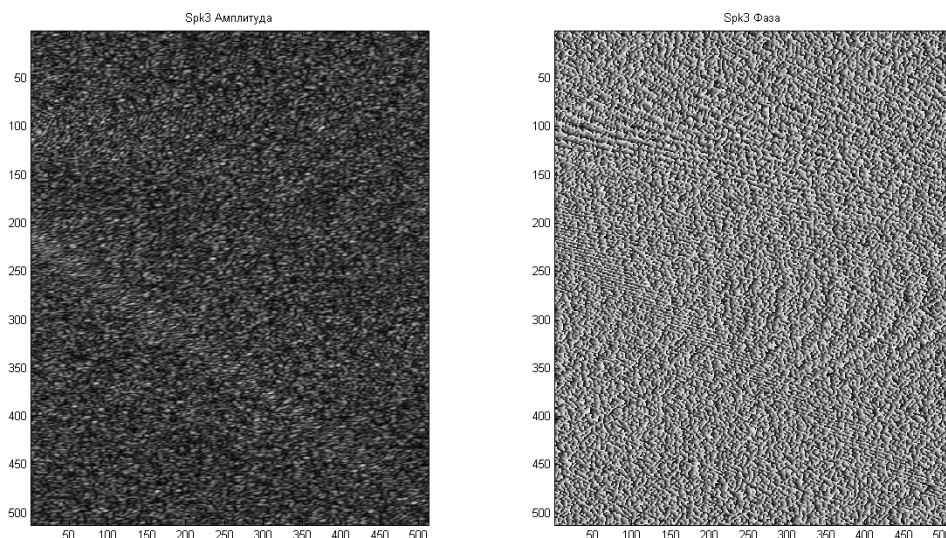
На Фиг.38, а и Фиг.38, б са представени амплитудата и фазата на комплексен SAR сигнал за получаване на първото комплексно изображение. На Фиг. 39,а и Фиг.39,б са представени амплитудата и фазата на комплексния SAR сигнал за получаване на второто комплексно изображение. На Фиг. 40, а и Фиг.40, б са представени амплитудата и фазата на комплексния SAR сигнал за получаване на третото комплексно изображение.



Фиг. 38. (а) Амплитуда, (б) Фаза на първи комплексен сигнал.



Фиг. 39. (а) Амплитуда, (б) Фаза на втори комплексен сигнал.



Фиг. 40. (а) Амплитуда, (б) Фаза на трети комплексен сигнал.

Алгоритъм за възстановяване на комплексното изображение от SAR сигнал

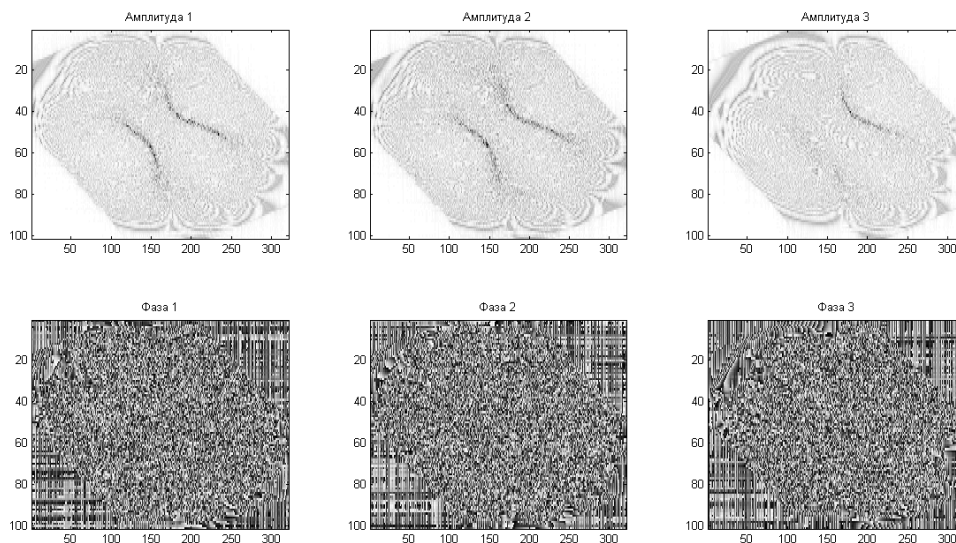
Извършва се демодулация на SAR сигнала чрез произведението на двумерната матрица S_{exr} с комплексно спрегнатия излъчен сигнал, за всеки излъчен импулс r , израз (14). Възстановяване на комплексното изображение се извършва чрез двукратна изчислителна процедура на бързо преобразование на Фурие, изрази (12) и (13). Вследствие двумерната матрица slc_{pk} е търсения комплексен образ на наблюдаваната повърхност, съдържащ: амплитудна и фазова информация за всеки пиксел от изображението.

Реализацията в програмна среда MATLAB на посочения алгоритъм за възстановяване на комплексното изображение от SAR сигнал е даден в Табл. 17.

<pre>% Възстановяване на образа чрез бързо преобразование на Фурие slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc))));</pre>
--

Табл. 17. Възстановяване на образа чрез бързо преобразование на Фурие.

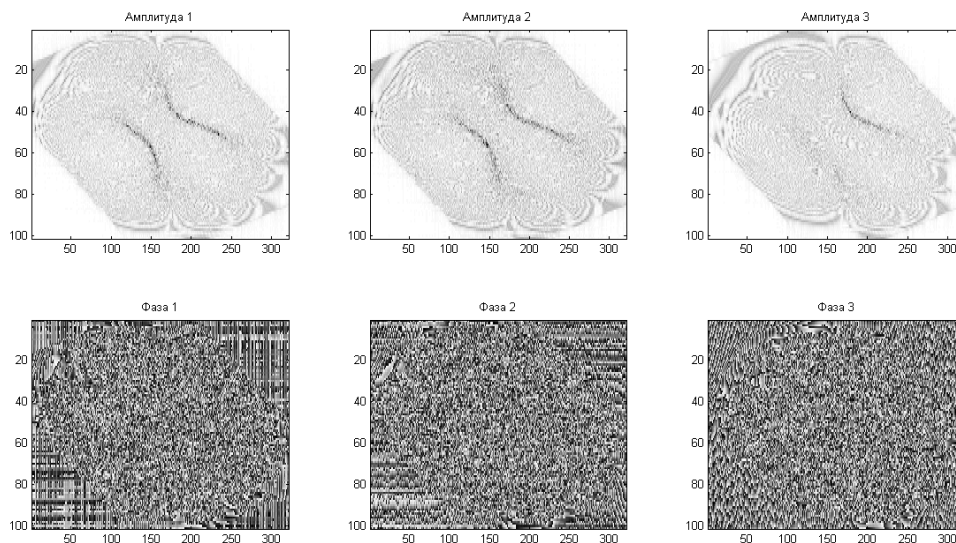
На Фиг. 41 е представена визуализация на получените амплитуди и фази на комплексните SAR изображения от трите сателитни радиолокационни системи.



Фиг. 41. Визуализация на получените комплексни изображения: амплитуда и фаза.

За целите на последващата диференциална обработка на така получените комплексни изображения е необходима тяхната корегистрация. В представения цифров експеримент е използвана ефективна подпикселна корегистрационна процедура, базирана на крос корелация, разработена от института TU-delft. При корегистрационната процедура второ и трето комплексно изображения са корегистрирани спрямо първо изображение. В случая първо комплексно изображение играе ролята на главно, а второ и трето са подчинени.

На Фиг. 42 е представена визуализация на амплитудите и фазите на комплексните SAR изображения от трите сателитни радиолокационни системи след тяхната съвместна корегистрация.



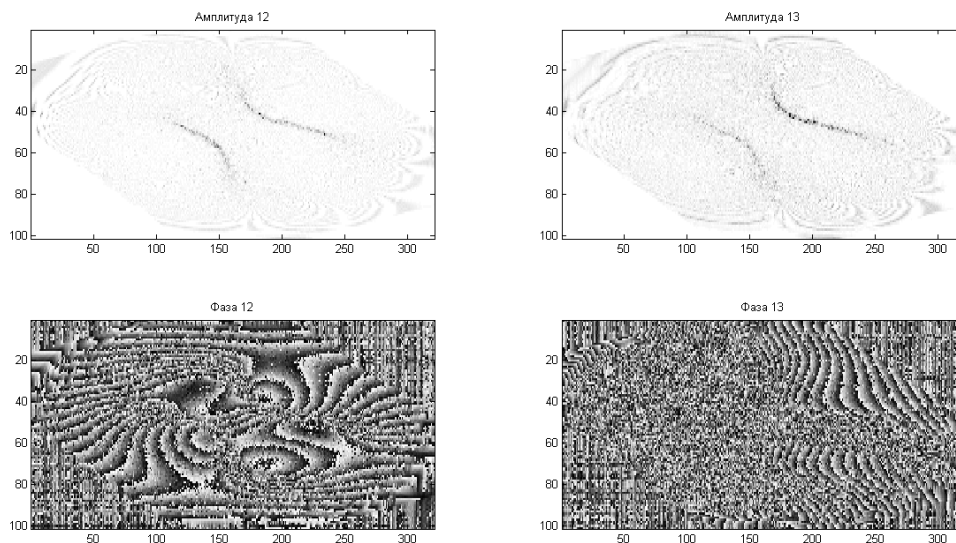
Фиг. 42. Визуализация на получените възстановени изображения: амплитудна и фазова информация след тяхната корегистрация.

Изчисляване на интерферограми и диферентни интерферограми

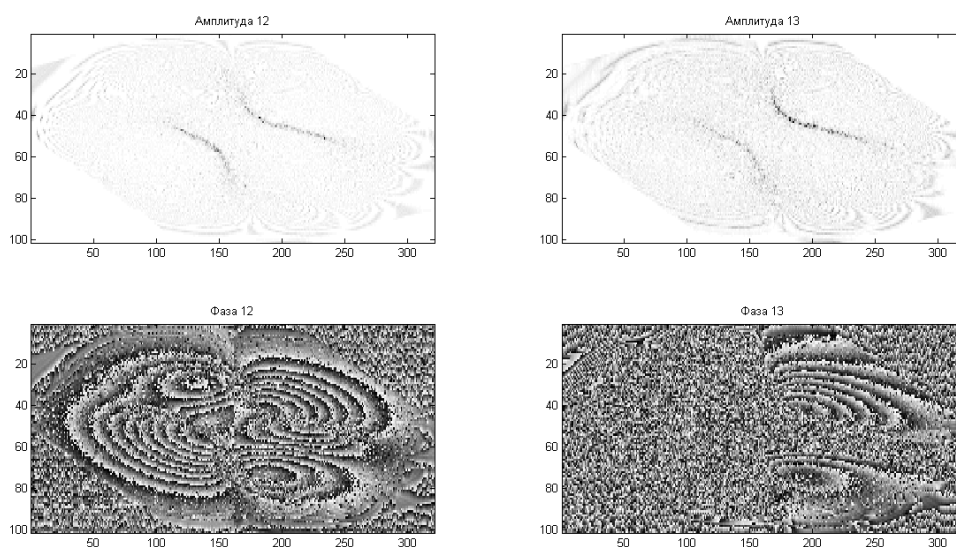
Следващата стъпка от изчислителния процес включва намирането на комплексните интерферограми от две комплексни изображения. В представения цифров експеримент са комбинирани първото и второ, както и първото и трето комплексни изображения. Двете комплексни интерферограми се получават от комплексно спрегнато умножение на участващите изображения. Програмният фрагмент, разработен в среда MATLAB за изчисляване на комплексните интерферограми и извличането на амплитудна и фазова информация от тях е представен в Табл. 18. Фиг. 43 и Фиг. 44 визуализират амплитудата (кохерентна карта) и фазата (интерферограма) на двете комплексни интерферограми, съответно наименувани за краткост 12 и 13.

```
%% Получаване на кохерентна карта и интерферограма
% В тази част от програмния фрагмент се изчислява комплексното изображение, извличат се
кохерентна карта и интерферограма и се визуализират.
% Изчисляване на комплексното изображение
I12 = slc1 .* conj( slc2 );
I13 = slc1 .* conj( slc3 );
% Извличане на кохерентната карта и интерферограмата
I12A = abs(I12);
I12P = angle(I12);
I13A = abs(I13);
I13P = angle(I13);
% Визуализация на кохерентната карта и интерферограмата
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(gray)
subplot(2,2,1), imagesc(I12A), title('Амплитуда 12');
subplot(2,2,2), imagesc(I13A), title('Амплитуда 13');
subplot(2,2,3), imagesc(I12P), title('Фаза 12');
subplot(2,2,4), imagesc(I13P), title('Фаза 13');
```

Табл. 18. Програмен фрагмент за изчисляване на комплексните интерферограми.



Фиг. 43. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения преди стартиране на ефективна подпикселна корегистрационна процедура.

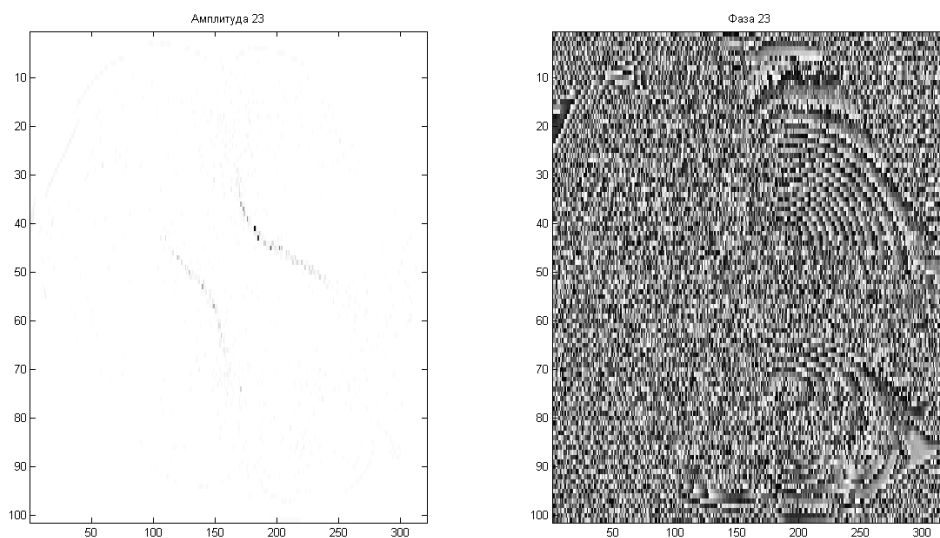


Фиг. 44. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения след стартиране на ефективна подпикселна корегистрационна процедура.

Във фазовия образ на Фиг.44 могат ясно да бъдат открити интерферометричните кръгове, съответстващи на релефа (интерферограма 12) и интерферометричните кръгове, съответстващи на деформацията (интерферограма 13).

Аналогично, за получаване на диферентна интерферограма се изчислява комплексно спрегнато умножение на двете интерферограми, резултат от предходната операция. Показан е резултатът от генериране на диферентна интерферограма,

демонстрираща изменението в релефа след настъпилата деформация. Амплитудата и фазата на комплексната диферентната интерферограма са представени на Фиг.45.



Фиг. 45. Амплитуда и фаза, извлечени от комплексната диферентна интерферограма.

3.4.3. Възстановяване на изображението от комплексният сигнал чрез двуменсионно дискретно преобразуване на Фурие

На базата на математическите модели на SAR сигналите, алгоритмите за възстановяване на изображенията и корегистрация в среда MATLAB® е реализиран числен експеримент, като са изведени висококачествени интерферограми показващи релефа на изследваната земна повърхност. Приложен е метод за получаване на интерферограма чрез двукратно облитане на района при различни базови линии. Повърхнината се наблюдава със SAR система, разположена на два сателитни носителя с параметри на InSAR сценария, представени в Табл.19.

	SAR1	SAR2
X1, km	10	12
Y1, km	10	10
Z1, km	800	800
Np	512	512
Nk	512	512
m_n	256	256
delta	2	2
V, m/s	1000	1000
Tp, s	0.025	0.025
Tk, s	0.0025	0.0025
f, GHz	10	10
deltaf, MHz	250	250

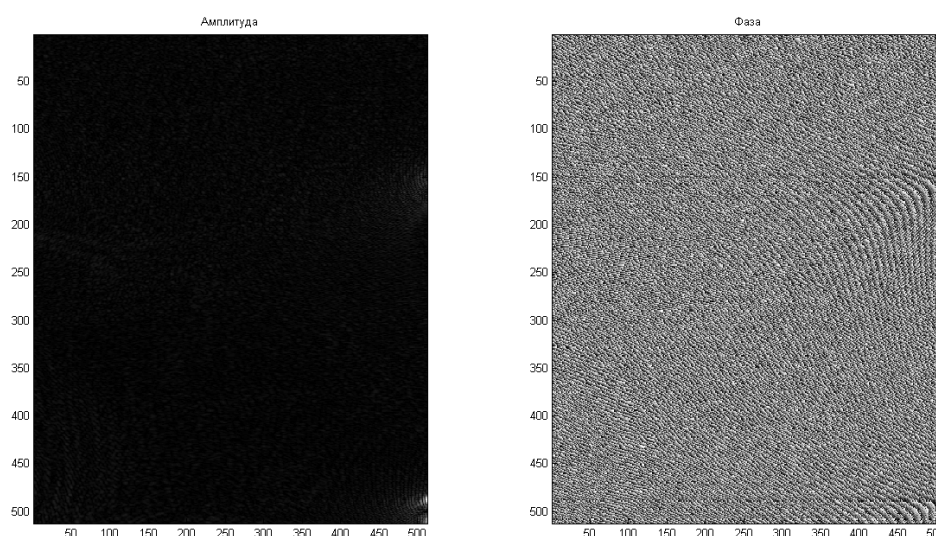
Табл. 19. Параметри на сателитните радиолокационни системи.

В таблицата $X1$, $Y1$ и $Z1$ са координатите на сателитните радиолокационни системи, N_p е броят на сондиращите импулси, N_k е броят на дискретите, равен на K , m_n е дименсията на изследваната повърхност, δ е разстоянието между точките на повърхността, V е скоростта на сателитния носител, T_p е периода на повторение на

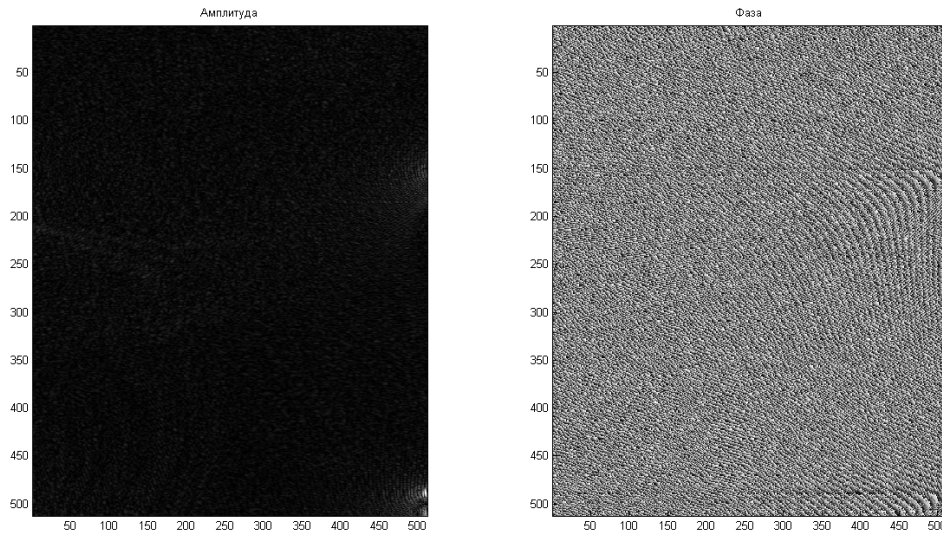
импулса (*Pulse repetition period*), T_k е времевият размер на дискрета, f е носещата честота на сигнала, Δf е честотната лента.

От Табл. 19 се вижда, че всички параметри на двете сателитните радиолокационни системи са почти идентични, като има разлика единствено в разстоянието им една от друга. Тази разлика формира - базовата линия, между двете системи SAR_1 и SAR_2 от 2000 метра.

Изчисленията в съответствие с алгоритъма извеждат комплексния SAR сигнал като S_{pk} двумерна матрица за всяка SAR система. На Фиг. 46, а и Фиг. 46, б са представени амплитудата и фазата на генерирания комплексен сигнал за получаване на първото изображение. На Фиг.47, а и Фиг.47, б са представени амплитудата и фазата на генерирания комплексен сигнал за получаване на второто изображение.



Фиг. 46. (а) Амплитуда, (б) Фаза на комплексния сигнал за получаване на първото изображение



Фиг. 47. (а) Амплитуда, (б) Фаза на комплексния сигнал за получаване на второто изображение

За възстановяване на комплексното изображение се използва двуменсионно дискретно преобразование на Фурие. Това е преобразование на Фурие върху едното измерение на данните, следвано от преобразуване на Фурие върху второто измерение на данните. Обратно двуменсионно преобразуване на Фурие е точно обратната трансформация на Фурие, извършвана върху двете измерения на данните. Формулите за двуменсионно дискретно преобразуване на Фурие и обратно двуменсионно дискретно преобразуване на Фурие, са дадени от Университета Райс, както следва:

$$(52) \quad F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})},$$

$$(53) \quad f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}.$$

Програмни фрагменти в среда MATLAB за реализацията на тази математика могат да бъдат разгледани в източник [136].

По този начин $M \times N$ изображение има $M \times N$ набор от комплексни коефициенти на Фурие. За прилагането на тази трансформация, се предпочита аналог на FFT, който да позволи бързо да се изчислят коефициентите на трансформиране. В действителност дву-димерсионното дискретно преобразуване на Фурие може да се отдели в две едно мерни дискретни преобразувания, които могат да бъдат реализирани с *FFT* алгоритъм (*бързо трансформиране на Фурие*), т.е. в сила е израза:

$$(54) \quad F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} e^{-[j\frac{2\pi ux}{N}]} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-[j\frac{2\pi vy}{N}]}.$$

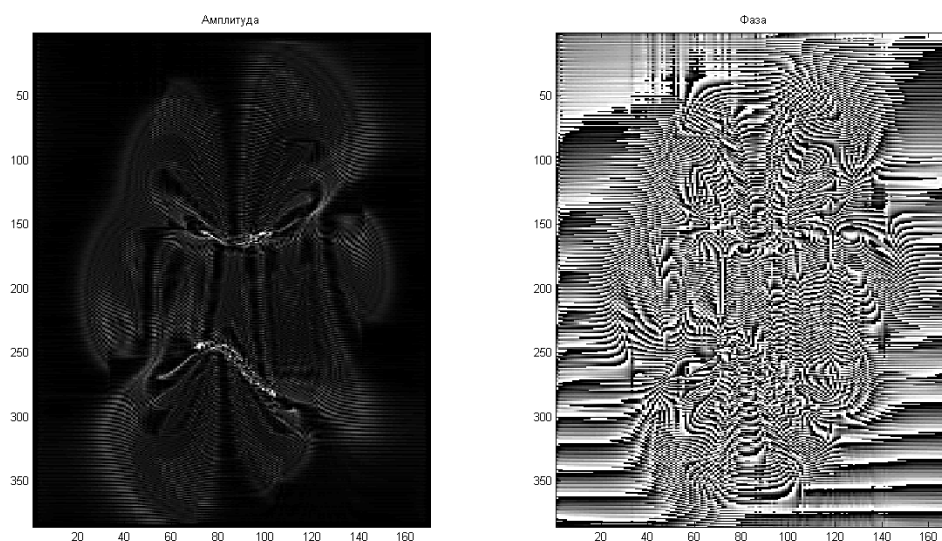
Функцията в програмната среда MATLAB, която имплементира двуменсионното дискретно преобразуване на Фурие, което се използва за възстановяване на изображението от комплексният сигнал е дадена в Табл.20.

% Възстановяване на образа чрез двуменсионно дискретно преобразуване на Фурие

slc = FFT2(Spk);

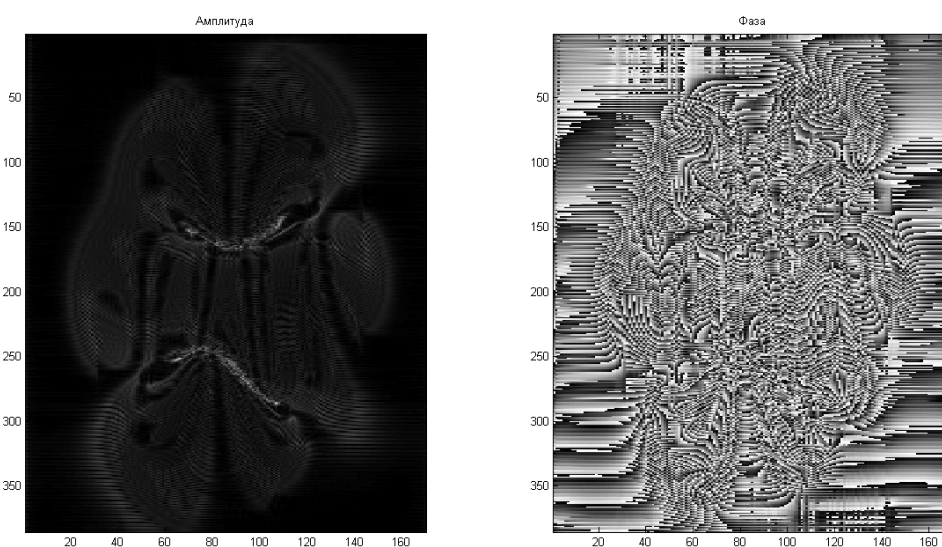
Табл. 20. Възстановяване на образа чрез двуменсионно дискретно преобразуване на Фурие.

На Фиг.48, а и Фиг.48, б са представени амплитудата и фазата на първото комплексно изображение след прилагане на двуменсионно дискретно преобразуване на Фурие.



Фиг. 48. (а) Амплитуда, (б) Фаза на първото комплексно изображение.

На Фиг.49, а и Фиг.49, б са представени амплитудата и фазата на второто комплексно изображение след прилагане на двуменсионно дискретно преобразуване на Фурие.

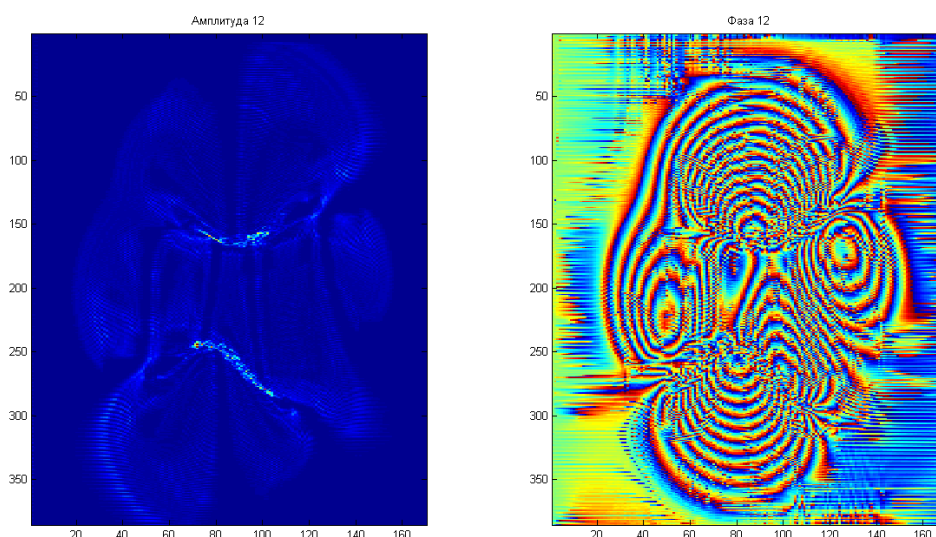


Фиг. 49. (а) Амплитуда, (б) Фаза на второто комплексно изображение.

Следващата стъпка от изчислителния процес включва получаване на кохерентна карта и интерферограма от двете комплексни изображения. Това се извършва чрез комплексно спрегнато умножение на изображенията. Програмният фрагмент, разработен в среда MATLAB за изчисляване на комплексните интерферограми и извличането на амплитудна и фазова информация от тях е представен в Табл. 21. Фиг. 50 визуализира амплитудата (*кохерентна карта*) и фазата (*интерферограма*) на комплексното изображение.

```
% Изчисляване на комплексното изображение
Image = slc1 .* conj( slc2 );
% Извличане на кохерентната карта и интерферограмата
Coherence = abs(Image);
Interferogram = angle(Image);
% Визуализация на кохерентната карта и интерферограмата
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)])
subplot(1,2,1), imagesc(Coherence), title('Амплитуда');
subplot(1,2,2), imagesc(Interferogram), title('Фаза');
```

Табл. 21. Програмен фрагмент за изчисляване на кохерентна карта и интерферограма.



Фиг. 50. Кохерентна карта (амплитуда) и интерферограма (фаза) получени от комплексните изображения.

В диферентната интерферограма, показана на Фиг. 50 се открояват интерферометричните кръгове, съответстващи на релефа на изследвания район.

3.4.4. Анализ на различни техники за разстилане на фазата в квази интерферометрични SAR изображения

Целта на този експеримент е да демонстрира практически имплементацията на различни техники за разстилане на интерферометричната фаза в среда MATLAB®. За тази цел са генерирани фазите на две комплексни изображения посредством квази SAR интерферометричен цифров експеримент в среда MATLAB®. Приложен е методът за получаване на комплексно изображение с помощта на една единствена радиолокационна система, монтирана на спътник, изведен в орбита на височина 800

km над земната повърхност. Чрез двукратно облитане на района, съответно с различна базова линия се постига разлика във фазовите картини. В настоящия експеримент, входните параметри са максимално идентични с реални параметри на сателита ENVISAT на Европейската агенция за космически изследвания [30] и са зададени в Табл. 22,

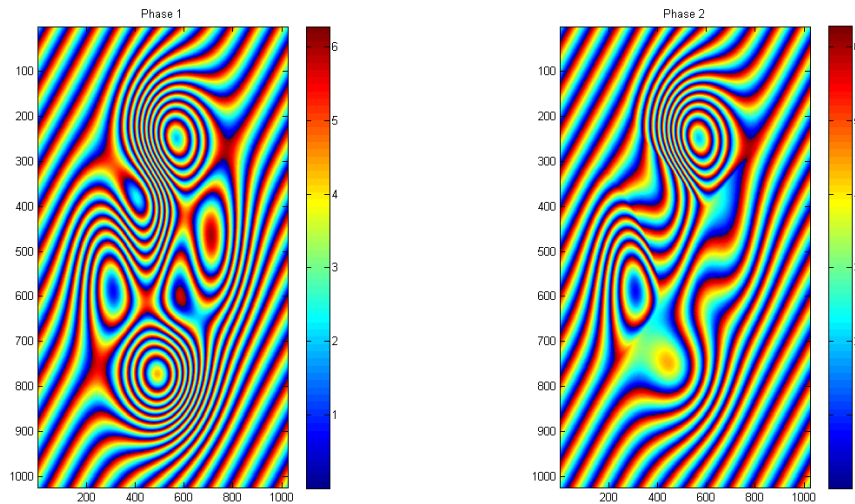
	SAR1	SAR2
X1, km	184	184,2
Y1, km	184	184,2
Z1, km	800	800
Np	512	512
m_n	512	512
delta	0.025	0.025
V, m/s	7450	7450
f, GHz	10	10
deltaf, MHz	100	100

Табл. 22. Параметри на радио-локационната система при двете облитания.

където $X1$, $Y1$ и $Z1$ (при ENVISAT височината е 800 km) са координатите в момента на възстановяване на образа на сателитна радиолокационна система при двете облитания, N_p е броят на сондиращите импулси, m_n е дименсията на изследваната повърхност, δ е разстоянието между точките на повърхността, наричана още: *ground resolution*, V е векторът скорост, зададен в [m/s] (при Envisat скоростта е 7.45 km/s), f е носеща честота на сигнала, δf е честотна лента.

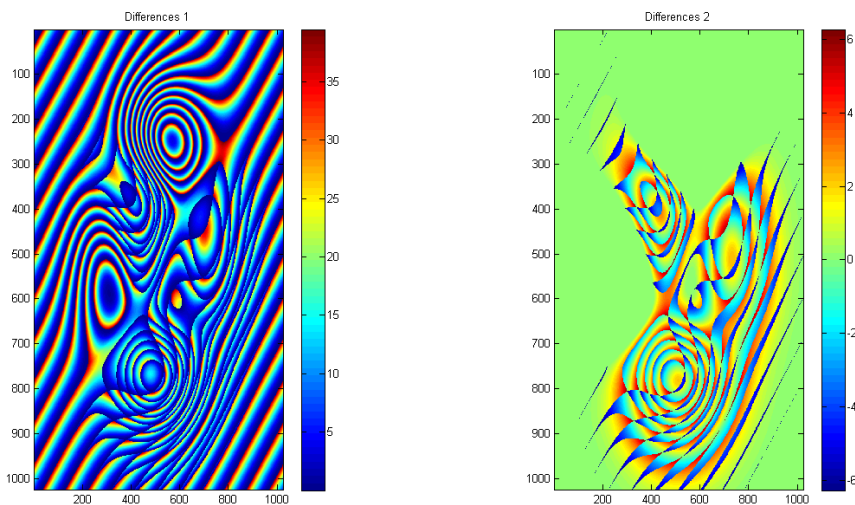
Както може да се види в Табл. 22, всички параметри при двете облитания на сателитната радиолокационна система са почти идентични, като има разлика единствено в координатите на втория носител в момента на възстановяване на образа. Тази разлика формира базова линия от 282,8427125 m, използвана в конкретния цифров експеримент.

Наблюдаваната земна повърхност е симулирана чрез функцията *peaks* в среда MATLAB®, като за целите на експеримента е деформирана както е показано на Фиг.37. Реализиран е числен експеримент с квази SAR интерферограми чрез математическите изрази от (48) до (51). Интерферометричната фаза на първоначалната повърхност и интерферометричната фаза на деформираната повърхност са представени на Фиг.51.



Фиг. 51. (а) Интерферометрична фаза на първоначалната повърхност, (б) интерферометрична фаза на деформираната повърхност.

Съществуващата фазова разлика, необходима за последващо разстилане на фазите е представена на Фиг.52.

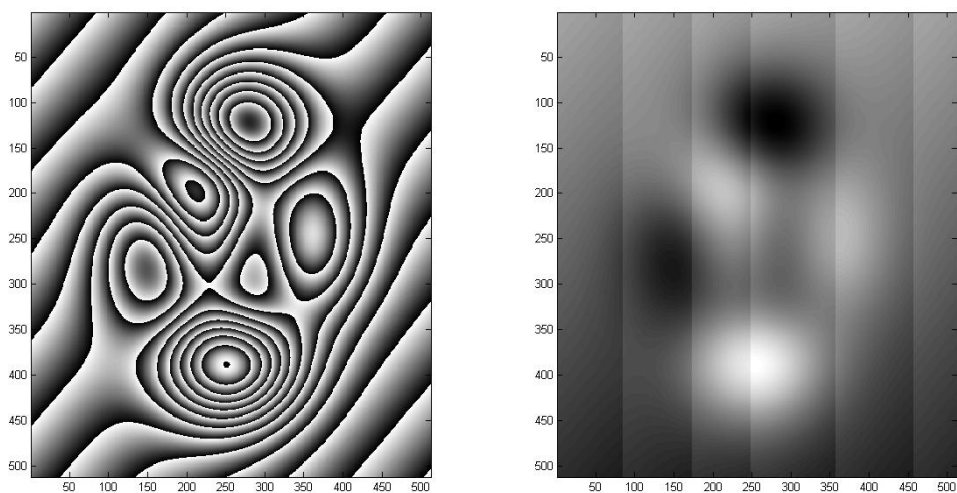


Фиг. 52. Диферентни фазови разлики с и без деформация.

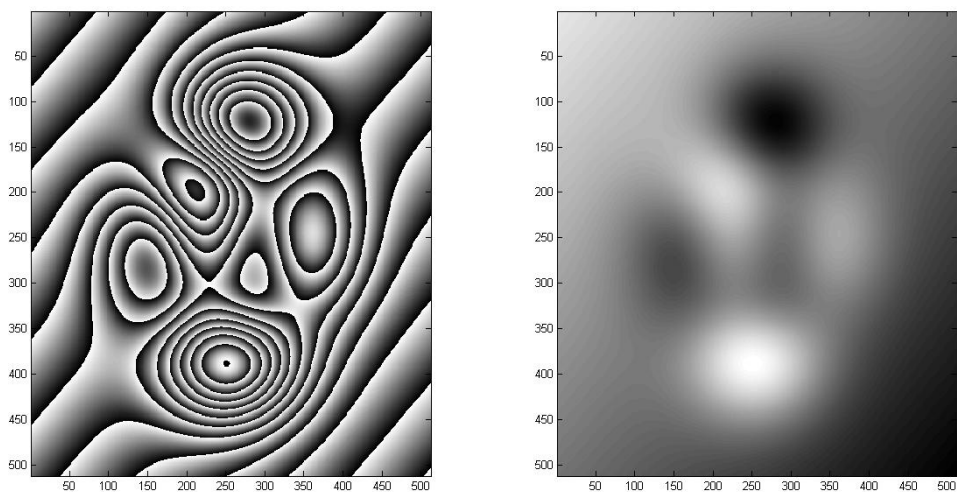
Разстилане на фазата

Прилагат се следните три алгоритъма за разстилане на фазата:

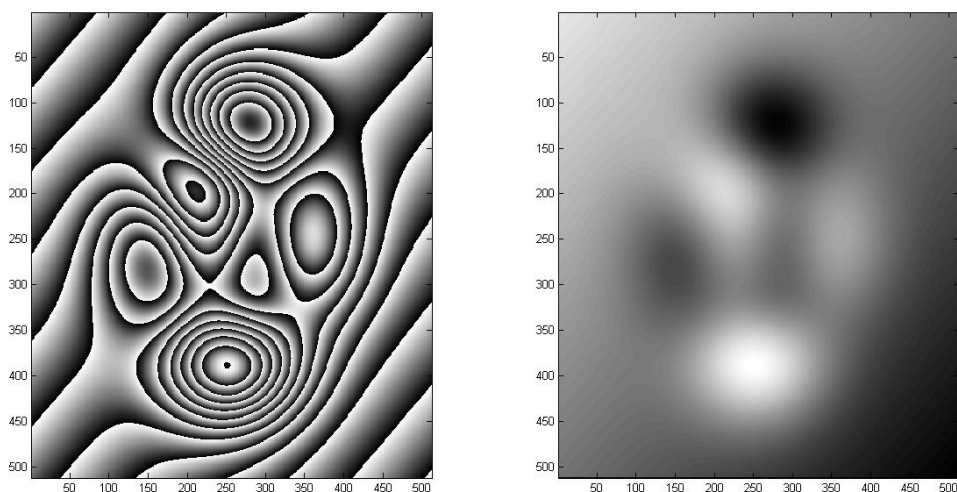
- MATLAB® unwrap function;
- 2D Costantini phase unwrapping based on network programming;
- 2D Goldstein branch cut phase unwrapping algorithm.



Фиг. 53. MATLAB® unwrap function.



Фиг. 54. 2D Costantini phase unwrapping based on network programming.



Фиг. 55. 2D Goldstein branch cut phase unwrapping algorithm.

На Фиг.53, Фиг.54, Фиг.55. са представени резултатите от прилагането на трите алгоритъма за разстилане на фазата, приложени върху получената интерферометрична фаза от първото облитане над изследваната земна повърхност без деформация.

3.5. Изводи

В настоящата глава са разработени математически модели и алгоритми за симулация на SAR сателитна интерферометрична система. На базата на аналитично-геометричната теория на апертурния синтез се дефинира геометрия на InSAR сценария и се предлага модел за реализация на SAR система за генериране на комплексни интерферометрични изображения. Разработен е математически модел на процеса на формиране на диферентни интерферограми, демонстриращи изменението в релефа след настъпила земна деформация. Приложен е алгоритъм за ефективна подпикселна корегистрация на комплексните изображения чрез крос-корелационна процедура [56], [57]. Цифровите експерименти потвърждават коректността на методология за генериране на интерферограми и диферентни интерферограми, чрез които се илюстрира SAR техника за разпознаване на деформации на земната повърхност.

4. НАТУРНИ ЕКСПЕРИМЕНТИ С РЕАЛНИ САТЕЛИТНИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

4.1. Синтез на интерферограма, базирана на цифров модел на релефа от района DILIJAN в Кавказ, Армения

4.1.1. Географско описание на изследвания район

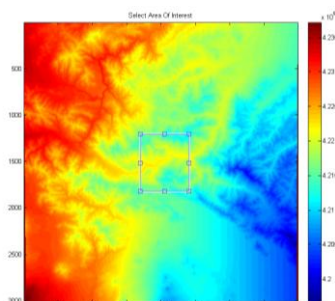
Dilijan е град в Кавказки регион, Армения, позициониран на географски координати: $40^{\circ} 44' 27''$ север и $44^{\circ} 51' 47''$ източна дължина. Използван е GEO TIFF файл съдържащ географска информация за района на интерес. Синтезирани са главно и подчинено комплексни изображения посредством програмната среда MATLAB. От така генерираната интерферометрична двойка от две комплексни изображения е синтезирана SAR интерферограма с разгънати фази. След това е използван алгоритъм за свиване на фазата и демонстрация на SAR процеса на обработка. Фиг.56 показва карта на Армения и местоположението на района Dilijan.



Фиг. 56. Местоположение на Dilijan, Кавказки регион, Армения.

4.1.2. Алгоритъм и програмиране

Източникът с данни е цифров модел на релефа в района Dilijan и се използва за целите на обработката. На Фиг.57 е показано изображение от GEO-TIFF файла на района Dilijan. Разработеният програмен фрагмент осигурява възможност за избор на определен район - сцена, която ще бъде обработвана и визуализирана посредством интерферометричната техника. Файлът с данни GEO-TIFF съдържа информация за височините, която е дадена на скалата отясно на Фиг.57.



Фиг. 57. Избор на район за изследване.

Две радиолокационни системи със синтезирана апертура са разположени на два сателитни носителя, движещи се в тандем, чиито координати във времето на получаване са както следва:

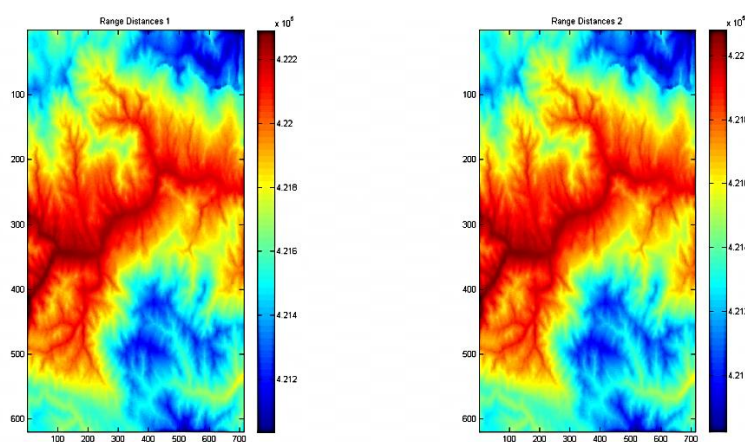
SAR -I: $XS1 = 0$ m, $YS1 = 300,3.103$ m, $ZS1 = 3.105$ m.

SAR -II: $XS2 = 0$ m, $YS2 = 300.103$ m, $ZS2 = 3.105$ m.

Изместването между сателитите дефинира базова линия от 300 метра между двете SAR антени. Дължината на вълната е $5 * 10^{-2}$ m.

Разстоянията от сателитите до всеки пиксел от района на интерес се изчислява по формулите за намиране на Евклидово разстояние до точка. Това става чрез корен от сумата на квадратите на разликите между координатите на сателита и координатите на всеки пиксел от повърхността, вж. изрази (48), където R_1 е двумерна матрица на разстоянията от първия сателит до всеки пиксел от повърхността, R_2 е двумерна матрица на разстоянията от втория сателит до всеки пиксел от повърхността, т.е. разстоянията R_1 и R_2 са функции от X и Y координатите на всеки пиксел от района на интерес.

Фиг.58 илюстрира изчислените разстояния от SAR-I и SAR-II до всеки пиксел от повърхността. В ляво са представени разстоянията до първия сателит, в дясно са показани разстоянията до втория сателит.



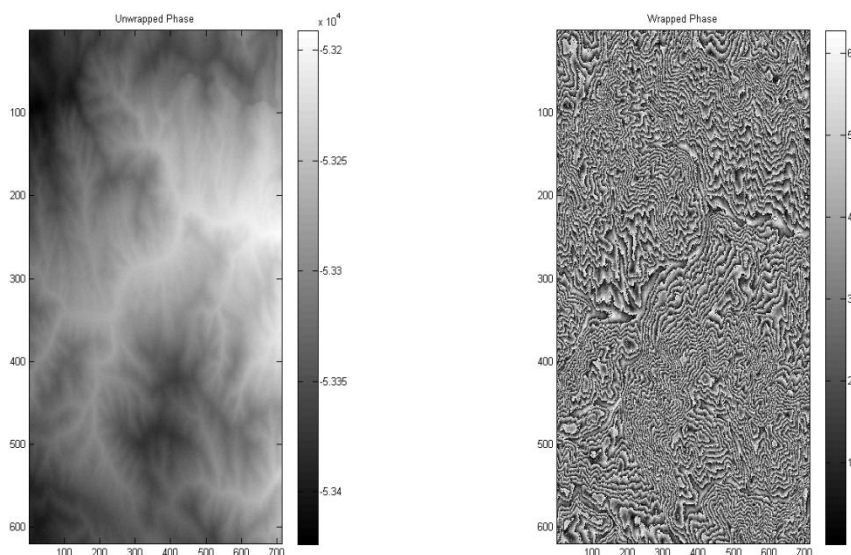
Фиг. 58. (a) Разстояния от първия сателит до пикселите на повърхността; (b) Разстояния от втория сателит до пикселите на повърхността, представени в псевдо-цветна карта.

Фазовите разлики се изчисляват чрез произведение на разликата на разстоянията R_1 и R_2 с четири пъти π разделено на дължината на вълната. Получава се разстелената интерферометрична фаза за всеки пиксел от повърхността, израз (49), където $P_{unwrapped}$ е свитата фаза, λ е дължината на вълната, R_1 и R_2 са разстоянията от всеки един от сателитите до всеки пиксел от повърхността.

След тази стъпка може да бъде изчислена свитата фаза, израз (50), посредством изваждането на правилното цяло число кратно на π от разстелената фаза. За тази цел се

въвежда допълнителна променлива K , израз (51), за дефиниране на цялото число кратно на π . Максималната стойност на променливата K умножена по 2π трябва да бъде извадена от разстелената фаза, изчислена преди това с израз (49). Следователно крайния резултат е свита фаза в правилния интервал от минус π до плюс π .

На Фиг. 59 са показани изчислените: (а) Разстелена фаза, (б) свита фаза



Фиг. 59. (а) Разстелена фаза; (б) Свита фаза.

4.1.3. Изводи

Представен е алгоритъм за синтез на интерферограма, базиран на цифров модел на релефа на региона Dilijan в Армения. Чрез използването на тези данни се извежда интерферометрична двойка посредством измервания на разстоянията от двете SAR сателитни системи до всеки пиксел от района по време на реконструкцията на SAR образа. От интерферометричната двойка се изчислява разстелена фаза и впоследствие се генерира свита фаза. В резултат се получават интерферометрични кръгове на наблюдавания район. Представени са резултатите от числен експеримент в среда на MATLAB. Разработеният алгоритъм може да се приложи за: симулации, моделиране и изследване на InSAR процеса на обработка, както и за генериране на интерферограми на конкретна област на Земята. Представеният алгоритъм за синтез на SAR интерферограма дава възможност да се изследват реални процеси, наблюдавани на повърхността на земната повърхност, като се използват данни от измерванията или картографски данни без да се налага употребата на реални сателитни данни.

4.2. Свлачищни явления в национален парк Севан - Армения

4.2.1. Резюме

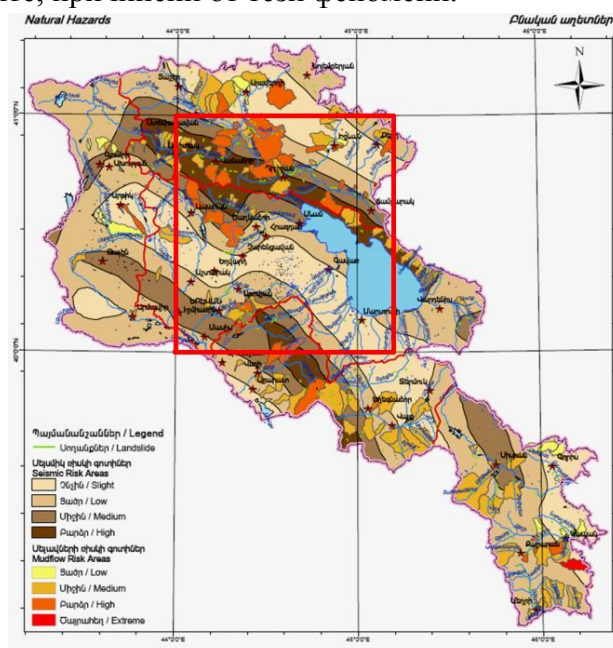
Наблюдение на Земята чрез SAR интерферометрия е предложено за пръв път от Graham [18] през 1974 г. и е приложено през 1986 г. от Zebker и Goldstein [24]. Техниката е разработена по-нататък от Li и Goldstein [137]. Днес са на разположение SAR данни от няколко космически сензори (например: ERS-1, ERS-2; JERS-1, Radarsat, Envisat) и голям брой изследователски групи работят в областта на InSAR

приложенията. Технологията успешно се прилага за изследване природни феномени [138], [139], [140], [141].

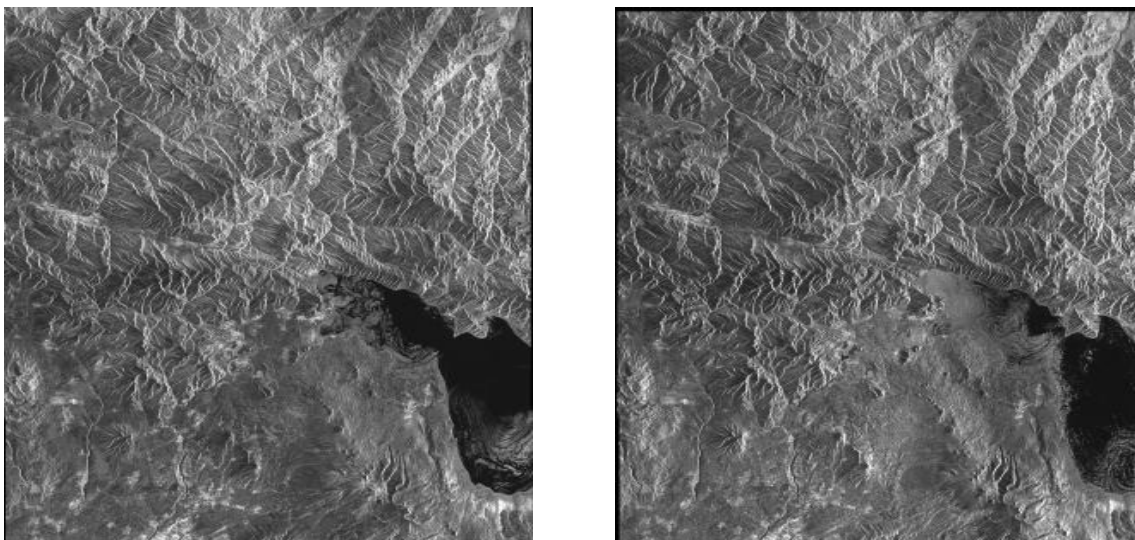
Основната цел на това изследване е да се извърши цялостна интерферометрична обработка на изображенията, за да се оценят свлачищни явления в национален парк Севан - Армения. Въз основата на данните от главно и подчинено комплексни изображения, получени на 30 август 2008 г. и 4 октомври 2008 г. чрез спътник Envisat, прибор ASAR [142], е извършена цялостна интерферометрична обработка за оценка на свлачищни явления в национален парк Севан - Република Армения. За тази цел се използва инструмента - *Identification Deformation Inspection and Observation Tool* [143], разработен от Берлинския университет по технологии. Този софтуерен пакет използва свободно достъпният цифров модел на релефа от мисията *Shuttle Radar Topography Mission* [29] (SRTM) и извършва напълно автоматично генериране на диферентни интерферограми от комплексните сателитни данни на спътника Envisat. Всички стъпки от процеса на интерферометрична обработка са изпълнени с максимално качество и прецизност. Резултатите показват почти спокойна земна повърхност в района на езерото Севан.

4.2.2. Област на проучването и използвани данни

Областта на проучването е регионът около езерото Севан - Кавказ, Армения. Този район се характеризира с много сложен релеф и топография и може да бъде ясно разделен на две части: планински район и езеро Севан. Както може да се види от картата на Фиг. 60, тази област е сеизмично активна и има потенциал за свлачищни явления. Ето защо оценки и прогнозни карти на сеизмични и свлачищни явления ще играят важна роля за предоставяне на полезна информация, с цел предотвратяване и намаляване на загубите, причинени от тези феномени.



Фиг. 60. Карта на национално опасните райони в Армения, Кавказ и областта на проучването са маркирани.



Фиг. 61. Комплексни сателитни изображения от инструмента ASAR на сателита Envisat, както следва: (а) 30 август 2008, (б) 4 октомври 2008).

Комплексните сателитни изображения (Фиг. 61) за настоящото изследване са предоставени от ESA [30]. Сцените покриват площ с размери 100 км x 100 км.

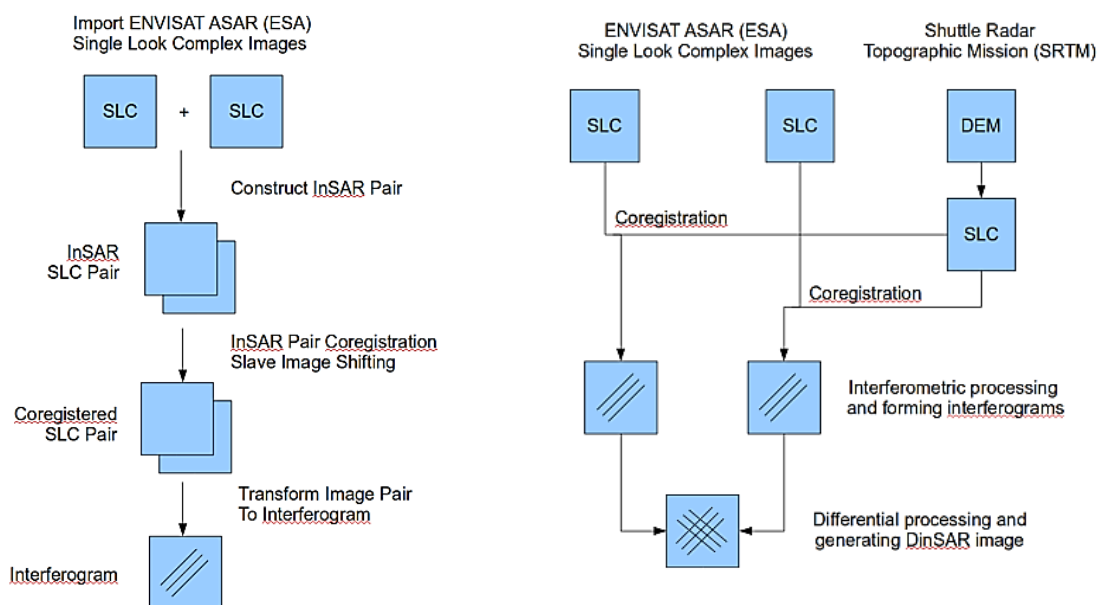
4.2.3. Свлачищни явления в района на езерото Севан

През последните години беше демонстрирано че SAR интерферометрията може да открива деформации по земната повърхност породени от: земетресения, вулканична дейност или изместване на ледени късове [25], [23], [28], [15], [141] и др. Сега изследователите търсят други приложения на SAR интерферометрията. Свлачищата са един от най-големите социални проблеми от гледна точка на превенция на бедствията. В настоящото изследване вниманието е насочено към техника за откриване на свлачища, чрез избиране на определен район от земната повърхност и прилагането на SAR интерферометричната техника. Свлачищата се разделят на два типа: единият е продължителното плъзгане, а другия тип е внезапно плъзгане. Интерес представлява повече първия случай, в който пострадалата област като цяло е по-малка от районите, засегнати от силни земетресения или вулканична дейности. Известно е, че методът с използването на цифров модел на релефа е широко разпространен за откриване на големи полета на деформации посредством InSAR технологията. Чрез този метод топографските ефекти в SAR интерферограмата се премахват с помощта на външен цифров модел на релефа. Тази техника е препоръчана в източник [23]. Интерес обаче представлява, дали тази техника е способна да открие относително малки и случващи се свлачища. Следователно предизвикателството тук е да се използва методът за интерферометрия, базирана на три преминавания. Тази технология не изисква наличието на цифров модел на релефа. Основни пунктове тук са: оценяване на базовата линия, разстилане на фазата, откриване на свлачищни зони. В случай на диферентна интерферометрия чрез многократно-облитане, задължителни процедури са добра оценка на базовата линия и разстилане на фазата. Откриването на свлачищни явления чрез SAR интерферограми е ново предизвикателство.

Схема на интерферометричния процес на обработка е показана на Фиг.64. Входните данни са комплексни изображения от инструмента *Advanced Synthetic Aperture Radar* (ASAR) на сателита ENVISAT.

ASAR работи в С-честотен диапазон с дължина на вълната $\lambda = 5.66$ cm, резолюция от 9.5 m, линия на визиране 5.5 m по посока на движението. Поляризацията е избираема и електронно управление на лъча дава възможност за избор между седем подслоеове с ъгли между 15^0 и 45^0 . Широчината на откоса е 100 km. Стандартният интервал за повторение на орбитата на спътника е 35 дни. Използват се главно и подчинено комплексни изображения, получени чрез сателитна ENVISAT и сензор ASAR, съответно на 30 август 2008 г. и 4 октомври 2008 г. За да се компенсира топографията и да се генерира диферентна интерферограма се използва цифров модел на релефа от мисията *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), проведена през февруари на 2000 г.

Първи компонент на процеса на обработка се счита намирането на топографската фаза и формирането на цифров модел на релефа. Втората част от обработката включва определянето на фазата, съдържаща изместването и формирането на карта на изместването. Плоската земна повърхност се премахва на първата стъпка след генерирането на интерферограмата (*не е показано отделно на Фиг.62*). С цел получаване на интерферометрична фаза на първата стъпка се извършва груба и финна корегистрация на подчиненото към главното изображения. След това се извършва комплексно спрегнато умножение на фазите, резултата на което по модул е кохерентната карта, а фазата представлява интерферограмата.



Фиг. 62. InSAR схема на интерферометричния процес на обработка.

SAR интерферограмата е дву-измерна относителна фазата на изображението (*свита фаза*), която е модул на 2π от абсолютната фаза (*разстелена фаза*). Критична

стъпка в интерферометричния процес на обработка е реконструкцията на абсолютната фаза от разстелената фаза, поради нееднозначност. Различни техники за извършване на разстилане на фазата са известни [144], [145], [146]. Необходимо е да се определи нееднозначността на фазата от 2π така, че относителната разлика на фазата между два съседни пиксела да е по-малка от $\pi/4$. Това не винаги се изпълнява. В случаи на дълги базови линии например води до фазови прекъсвания. Шум във фазата предизвиква размазване на интерферометричните кръгове и неясноти.

За разстилане на фазата е приложен метода на най-малките квадрати. Той предлага итеративен подход за коригиране на грешки, проверка на разликата между измерената и извлечената разстелена фаза след всяка итерация. В края на обработката фазата, свързана с изместването се трансформира в картова проекция и се оразмерява. Това става с помощта на цифров модел на релефа, получен от InSAR и прецизни данни за орбитата, ако има такива, или с геодезически наземни контролни точки.

Известно е, че ако е налице висококачествен цифров модел на релефа от друг източник, то той може да бъде използван за генериране на синтезирано комплексно (SLC) изображение и да трансформира InSAR изображението в картова проекция (*още наречена геокодиране*). Времеви интервал между SAR изображенията, които се използват за анализ на движението зависи от скоростта на изместването и информацията за терена. За картографиране на бавни земни движения в Кавказкия район, които са типично няколко сантиметра на година, се използват интерферометрични ASAR и SRTM двойки, покриващи голям времеви интервал. След взаимната им корегистрация и генерирането на интерферограмите се получава диферентна интерферограма.

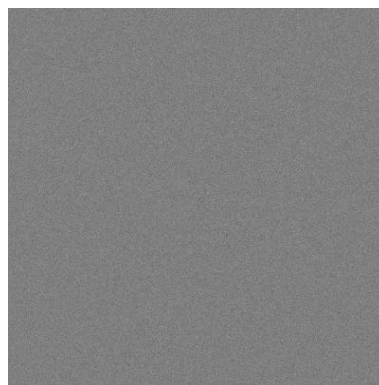
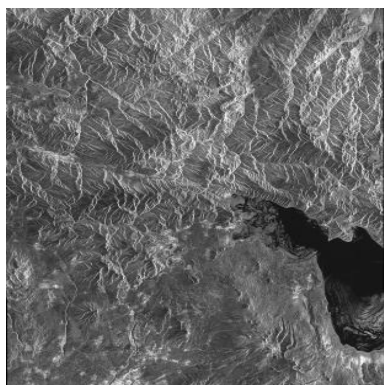
За разследване на свлачища и природни бедствия се препоръчва да се използват InSAR карти на изместването, заедно с друга информация, например топографска или геологическа карта и оптически изображения, и обработката на данните да продължи за препоръчване в географска информационна система.

4.2.4. Експериментални резултати

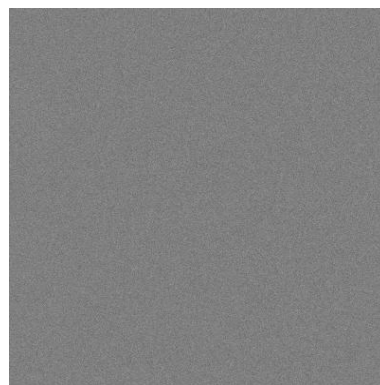
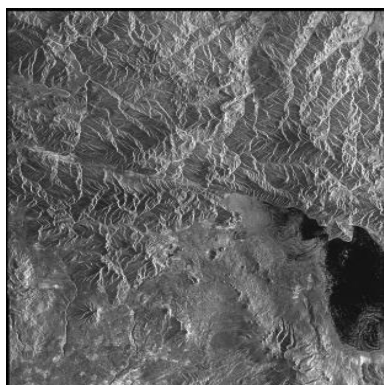
Интерферометрични параметри на прибора ASAR от сателита ENVISAT: разлика в Доплеровата централна честота е 6,3705139 Hz, тотална дължина на базовата линия е 117,16172 m. Ъгълът на надир е MAS 22,620232 (главно) / SLV 22,594638 (подчинено).

На Фиг.63 са представени: амплитуда (а) и фаза (б) на главното комплексно изображение. На Фиг.64 са представени: амплитуда (а) и фаза (б) на подчиненото комплексно изображение. На Фиг.65 е показана интерферометрична фаза след изваждане на плоската повърхност. На Фиг. 66 е показана осреднена амплитуда и фаза заедно с интерферометрична фаза след оплоскостяване на фазата. Тук интерферометричните кръгове ясно показват релефа. На Фиг.67 е изобразена интерферометрична кохерентна карта, която показва взаимно-свързаност между корегистрираните комплексни изображения (*наричана още степен на кохерентност*). На Фиг.68 е показана диферентната фаза. На Фиг.69 е показана осреднена средна амплитуда заедно с диферентната фаза – DInSAR. Последните изображения показва

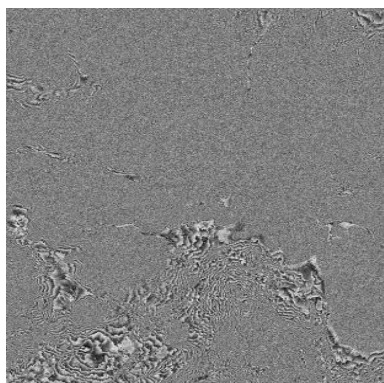
свлачищни феномени около езерото Севан в периода февруари 2000 година до октомври 2008 година.



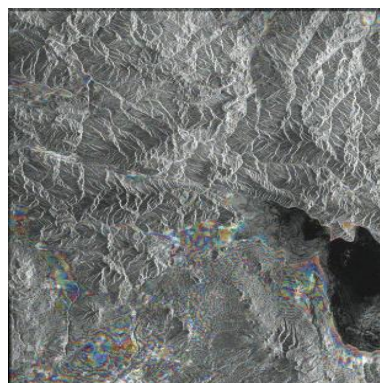
Фиг. 63. Главно комплексно изображение (а) Амплитуда, (б) Фаза.



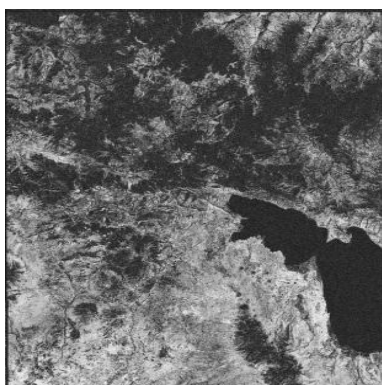
Фиг. 64. Подчинено комплексно изображение (а) Амплитуда, (б) Фаза.



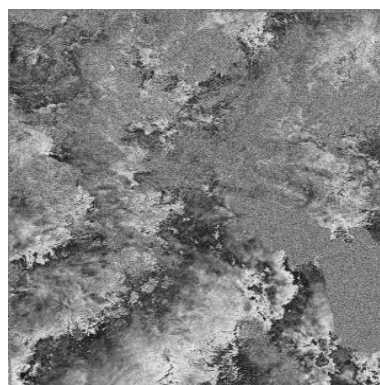
Фиг. 65. Интерферометрична фаза след оплоскостяване.



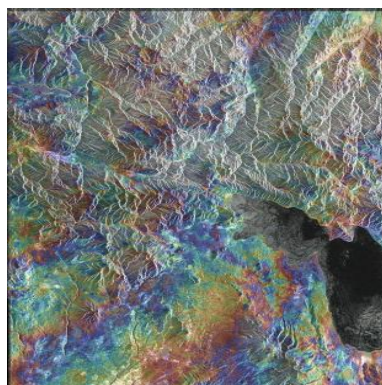
Фиг. 66. Осреднена амплитуда и интерферометрична фаза след оплоскостяване.



Фиг. 67. Интерферометрична кохерентна карта.



Фиг. 68. Диферентна фаза.



Фиг. 69. Амплитуда (релеф) с диферентна фаза - DInSAR.

4.2.5. Изводи

В настоящия експеримент на базата на данни от главно и подчинено комплексни изображения, получени от сензора ASAR на сателита ENVISAT, съответно на 30 август 2008 година и на 4 октомври 2008 година, са извършени всички стъпки от процеса на интерферометрична обработка, за да се оценят свлачищни феномени в района на Национален парк Севан – Армения. За тази цел е използван продукта *Identification Deformation Inspection and Observation Tool* на Берлинския технически университет. Този инструмент използва свободно достъпния цифров модел на релефа от мисията *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, проведена през февруари 2000 година, с цел пълно автоматично генериране на диферентни SAR интерферограми от комплексните изображения на ENVISAT. Всички интерферометрични стъпки на процеса на интерферометрична обработка са извършени с максимално качество и прецизност. Две комплексни изображения в района на национален парк Севан – Армения са обработени за генериране на интерферограма, включително интерферометрична фаза и кохерентна карта. Генерирана е диферентна интерферограма от данните от мисията SRTM и SLC изображенията от ENVISAT. Резултатите илюстрират бавно земно изместване в района на езерото Севан в периода 2000-2008 година.

4.3. INSAR изследване на свлачища в района на езерото Севан-Армения

4.3.1. Резюме

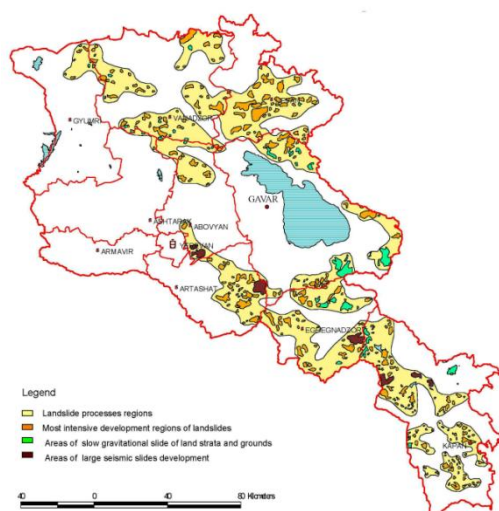
Регионът на езерото Севан в Армения представлява интерес поради негово високо местоположение, а също така и поради свлачищните явления, породени от метеорологични и хидрологични причини. Като *ESA Principal Investigator Number C1P-6051* бяха заявени четири комплексни изображения от инструмента ASAR на сателита ENVISAT, включително две от 2008 година и две от 2009 година в района на езерото Севан в Армения. Едното от тези изображения бе избрано за главно, а останалите за подчинени. Следователно генерирани са три интерферометрични двойки. Използвани са данни от мисията SRTM на NASA, с цел да се бъде премахната топографията от интерферограмите. Генерираните три интерферограми илюстрират намаляване на кохерентността, породена от висока времева декорелация, което означава намаляване на съгласуваността на SLC изображенията във всяка интерферометрична двойка, в зависимост от времето на получаване на всяко от тях.

4.3.2. Геологическо описание на района на езерото Севан

Армения е планинска страна, където 90% от нейната територия е разположена на надморска височина над 1000 м. Планинските склонове, някога гористи и зелени в днешни дни са скали, а оставащите горски масиви изчезват, тъй като те са източник на енергия за зимата за отопление на населението. Планинските склонове, които са загубили тяхната естествена защита срещу времето и дъждовете в комбинация с периодични земетресения са причина за свлачища в тези райони [147].

Езерото Севан се намира в северната част на Арменския вулкан „Висока земя“, 60 км на север от столицата на Армения, Ереван. То е най-големия сладководен басейн в Евразия, разположено на най-голяма надморска височина [148].

Карта на свлачищата в Република Армения е представена на Фиг.70.



Фиг. 70. Карта на свлачищата на територията на Република Армения.

4.3.3. Въведение и цел на изследването

Като партньор на Европейската агенция за космически изследвания [30] по проект C1P-6051, Бургаският свободен университет има възможността да заяви, получи и обработи реални сателитни данни. Единственото изискване на ESA е да се

посочи източника на данните, използвани в изследването [149], [150]. В това изследване са използвани четири сателитни изображения, получени от сателита ENVISAT инструмент ASAR. Списъкът с използваните продукти е представен в Табл. 23 и 24.

Сателитните изображения са върху един и същ район на национален парк Севан, Армения. Заявени бяха две изображения от 2008 година и две от 2009 година. Инструментът SAR ASAR прилага радарна технология, за да сканира земната повърхност, използвайки Доплеров алгоритъм определящ разстоянието, за възстановяване на изображението. Получените изображения са комплексни и съдържат амплитудна и фазова информация. Само фазовата информация е необходима за генерирането на интерферометрични двойки. Чрез премахване на ефекта на топографията с помощта на цифров модел на релефа от всеки две интерферометрични двойки може да бъде получена диферентна интерферограма (*Например мисията SRTM на NASA*).

4.3.4. Основни интерферометрични характеристики

Радиолокационната система със синтезирана апертура (SAR) записва отразените сигнали от множество радарни импулси и генерира комплексни изображения. Излъчените импулси достигат отразяващите точки и се отразяват обратно, за да се формира SAR сигнал и комплексен образ. Комплексните SAR изображения съдържат информация за амплитудата и фазата на отразените импулси от повърхността за всяка точка от клетъчната резолюция. Излъчващи точки на различно разстояние от радиолокационната система, ще предизвикат различно време закъснение в интервала между излъчването и приемането им. Поради синусоидалната природа на излъчвания сигнал, това закъснение е еквивалентно на фазовата разлика между излъчените и получените сигнали [151].

Използвани са данни от интерферометрична радиолокационна система със синтезирана апертура (InSAR), получени от сателит с една антена при две облитания на района с малко изместване на орбитата.

Комплексната SAR интерферограма се получава посредством комплексно спрегнато умножение на SAR изображенията, получени от двете облитания. Амплитудата представлява кохерентна карта, докато фазата представя интерферограма, т.е. фазовите разлики между двете изображения [151].

4.3.5. Описание на данните и инструмента

В това изследване е използвана InSAR техника за получаване на интерферограма. Данните от сателита ENVISAT инструмент ASAR са представени в (Табл.23).

Short name	File name
33985	ASA_IMS_1PNIPA20080830_071539_000000162071_00364_33985_5065.N1
34486	ASA_IMS_1PNIPA20081004_071540_000000162072_00364_34486_5066.N1
38494	ASA_IMS_1PNIPA20090711_071540_000000162080_00364_38494_1122.N1
40498	ASA_IMS_1PNIPA20091128_071532_000000162084_00364_40498_1121.N1

Табл. 23. Списък на използваните продукти.

Табл.24 илюстрира амплитудите и фазите на оразмерените комплексни изображения в съотношение 1:5, както следва: 33985A, 33985P, 34986A, 34986P, 38494A, 38494P, 40498A, 40498P.

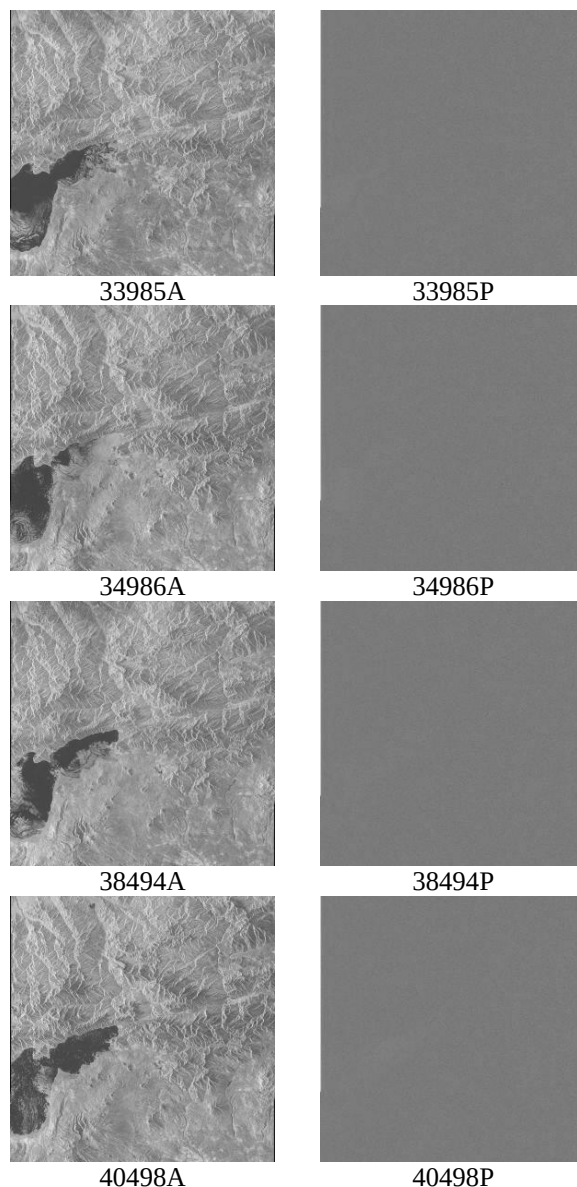


Табл. 24. Оразмерени комплексни изображения.

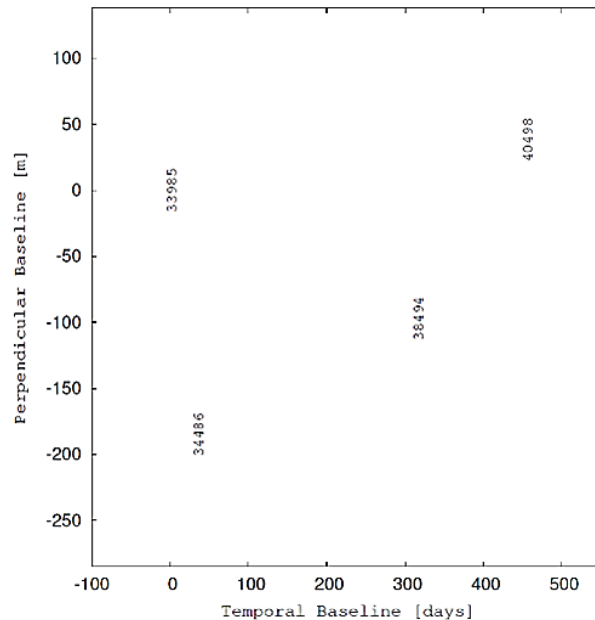
За целите на интерферометричната обработка е необходимо да се избере едно от изображенията като главно, а останалите като подчинени. В това изследване, изображение 33985 се счита за главно, а всички други играят ролята на подчинени (34986, 38494, 40498). Генерираните три интерферометрични двойки са както следва: 33985-34986, 33985-38494, 33985-40498. В Табл. 25 е представена оценка на базовите линии на комплексните изображения. Първата колона е перпендикулярната базова линия (*в метри*), втората колона е времевата базова линия (*в дни*) и последната колона са кратките имена (*вж. Табл. 23*) на използваните комплексни изображения.

0	0	33985
---	---	-------

35	-185,3	34486
315	-96,9	38494
455	38,1	40498

Табл. 25. Оценка на базовите линии на комплексните изображения.

Фиг.71 графично илюстрира по оста Ох перпендикулярната базова линия (в метри), по оста Оу е времевата базова линия (в дни).



Фиг. 71. Графика на перпендикулярни и времеви базови линии.

4.3.6. Прилагане на цифров модел на релефа

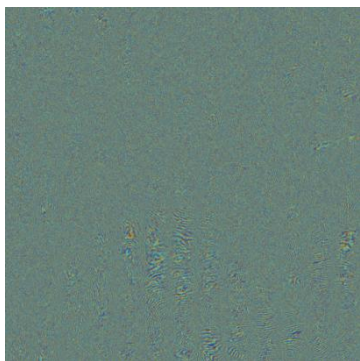
За целите на диферентната интерферометрична обработка е използван цифров модел на релефа от SRTM3 мисията на NASA. Той предоставя височинна карта с резолюция 30 метра. Използвани са следните SRTM файлове: N39E043.hgt, N39E044.hgt, N39E045.hgt, N40E043.hgt, N40E044.hgt, N40E045.hgt, N41E043.hgt, N41E044.hgt, N41E045.hgt. Формирани са два файла съдържащи цифров модел на релеф, както следва: E020N40.dem и E020N90.dem. На Фиг.72 е показан обединения цифров модел на релефа, получен от тези входни файлове. Картата покрива цялата територия на изследвания район.



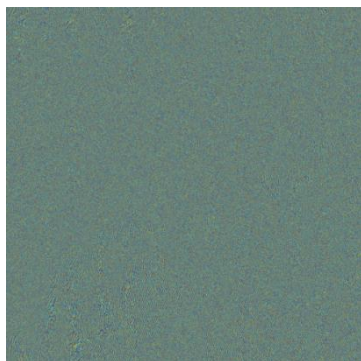
Фиг. 72. Обединен цифров модел на релефа.

4.3.7. Резултати от изображенията и интерферометричното изследване

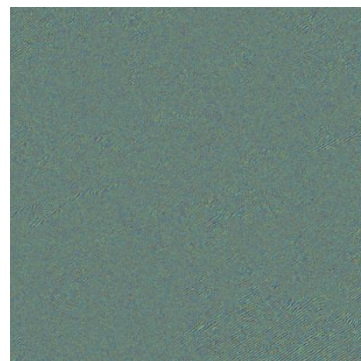
В съвкупността от фигури от Фиг. 73 до Фиг.87 по-долу са представени резултати от интерферометричната обработка между две комплексни изображения, представени със съответните номера както следва: лява колона 33985-34986, средна колона 33985-38494, дясна колона 33985-40498.



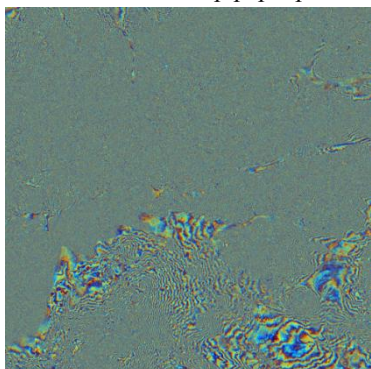
Фиг. 73. 33985-34486 -
Комплексна интерферограма.



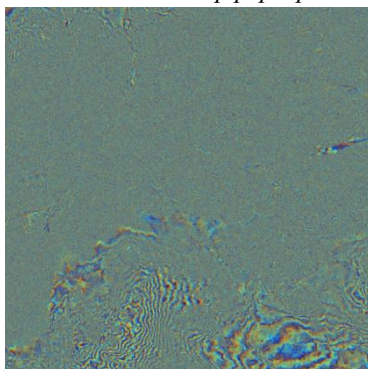
Фиг. 74. 33985-38494 -
Комплексна интерферограма.



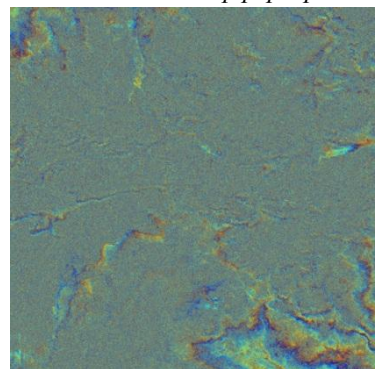
Фиг. 75. 33985-40498 -
Комплексна интерферограма.



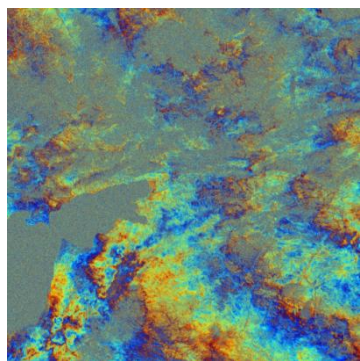
Фиг. 76. 33985-34486 -
Оплоскостена интерферограма.



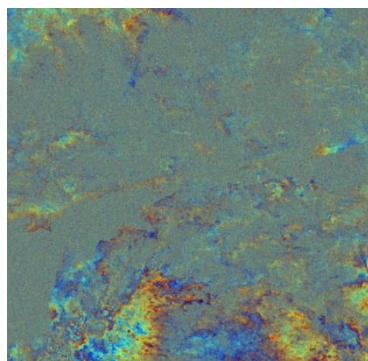
Фиг. 77. 33985-38494 -
Оплоскостена интерферограма.



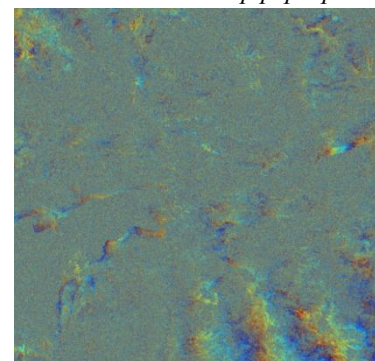
Фиг. 78. 33985-40498 -
Оплоскостена интерферограма.



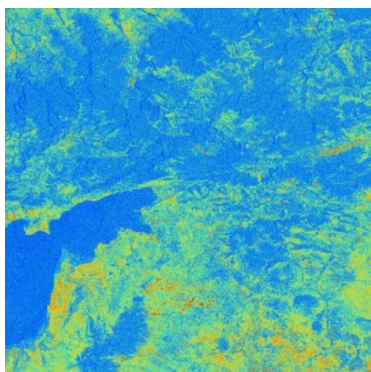
Фиг. 79. 33985-34486 –
Интерферограма с премахната
топография.



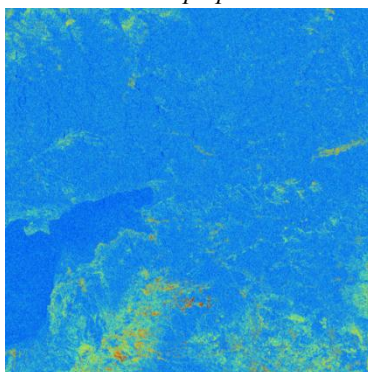
Фиг. 80. 33985-38494 –
Интерферограма с премахната
топография.



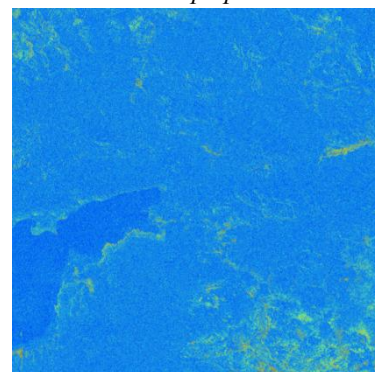
Фиг. 81. 33985-40498 –
Интерферограма с премахната
топография.



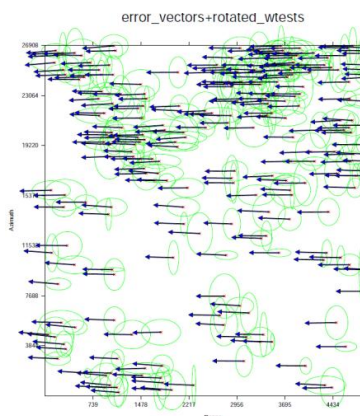
Фиг. 82. 33985-34486 –
Кохерентна Карта.



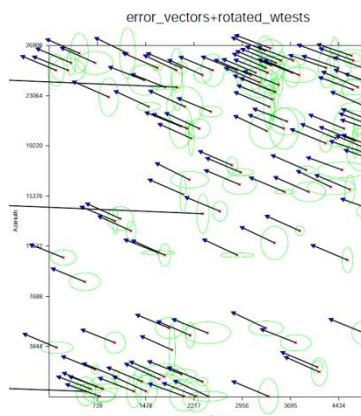
Фиг. 83. 33985-38494 –
Кохерентна Карта.



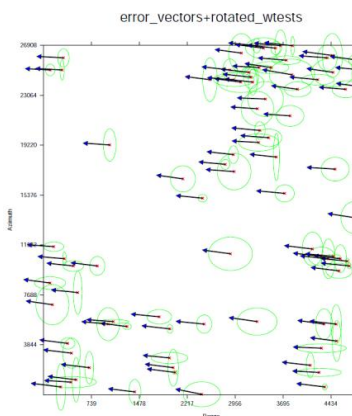
Фиг. 84. 33985-40498 –
Кохерентна Карта.



Фиг. 85. 33985-34486 – Вектори на грешки и ротация.



Фиг. 86. 33985-38494 – Вектори на грешки и ротация.



Фиг. 87. 33985-40498 – Вектори на грешки и ротация.

Фигурите представят резултатите от интерферометричния процес на обработка както следва: комплексна интерферограма, оплоскостена интерферограма, интерферограма с премахната топография, кохерентна карта, вектори на грешки и ротация. Фигурите за интерферометричната двойка 33985-34486 са номерирани (73,76,79,81,85), за интерферометричната двойка 33985-38494 фигурите са номерирани (74,77,80,82,86) и за интерферометричната двойка 33985-40498 фигурите са номерирани (75,78,81,83,87).

4.3.8. Изводи

Сравнителният анализ на резултатите показва леки измествания в района на езерото Севан и високите части на изследвания район. Поради загуба на кохерентност, причинена от времева декорелация, не е възможна коректна оценка на изследваната земна повърхност. Декорелацията може да се наблюдава както в кохерентната карта, така и в интерферограмата с премахната топография. Най-ясни интерферометрични кръгове има в двойката 33985-34986 и най-слабо изразени в двойката 33985-40498. Разликата в базовите линии не трябва да бъде подценявана. Базовата линия (в метри) и времевата базова линия (в дни) трябва да бъдат подбрани внимателно, защото и от двете зависи прецизността на DInSAR обработката. Дори малки грешки в оценката на базовите линии могат да доведат до декорелация.

4.4. Цифрови модели на релефа на рискови територии в Кавказ-Армения

4.4.1. Резюме

В това изследване са описани резултати от работата на международен екип от Бургаски свободен университет (БСУ) и Ереванския държавен университет (ЕДУ) в рамките на проект на НАТО, номер CLG: ESP.EAP.CLG. 983 876. Генерирани са цифрови модели на релефа за избрани области от Армения с високо ниво на риск, като: природни бедствия, утаяване, свлачища, кални реки, земетресения и др. Цифровите модели на релефа могат да бъдат използвани за създаване на регионална система за мониторинг на природни бедствия на територията на Армения, с цел да се контролират топографски промени на териториите с висока степен на риск. Използват се инструменти като: InSAR, системи от математически модели, географски информационни системи (ГИС) и математически алгоритъм за обработка на сателитни

снимки. Резултатите от мониторинга и моделирането могат да бъдат периодично предоставяни на местните власти за предприемане на мерки, с цел да се предотвратят вероятни природни бедствия и тяхното въздействие върху населението и комуникациите.

4.4.2. Въведение

През 2010-2011 година, съвместен научен българско-арменски екип (*Бургаски свободен университет - България и Ереванския държавен университет - Армения*) осъществява проект на НАТО № 983 876 на тема „InSAR моделиране и наблюдение на геоложките явления при бедствия в Кавказкия регион – Армения“. Основната цел на проекта е разработване на система за мониторинг на природни бедствия. Разследването включва области, където има слягане на скални маси, свлачища или земетресения на територията на Армения. Основната техника за научни изследвания се състои от InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*) системи за обработка, математически инструменти за реализация на цифрови модели, ГИС технологии и математически модели за обработка на сложни изображения, получени от ASAR сензори, монтирани сателита ENVISAT и SAR инструменти, установени на спътници ERS-1 и ERS-2. Разработената система за мониторинг може да се използва за прогнозиране на топографски промени на рискови области в Армения, да се оцени сегашната тяхна ситуация и да изпълни дългосрочно прогнозиране на вероятните природни бедствия. Основните инструменти в това проучване са методите и алгоритмите на технологията *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR). *Synthetic Aperture Radar* (SAR) е кохерентен активен чувствителен елемент, използван в радио-визионна интерферометрична SAR техника. SAR интерферометрията се основава на информацията, получена от фазовата разлика, извлечена от две комплексни стойности на пиксели в SAR изображения, получени от различни позиции в орбитите на носителите и регистрирани на подпикселно ниво. Тази информация е полезна при измерване на няколко геофизични характеристики, като: топография, наклон, деформация (*вулкани, земетресения, и ледени полета*), ледникови проучвания, растеж на растителността и др.

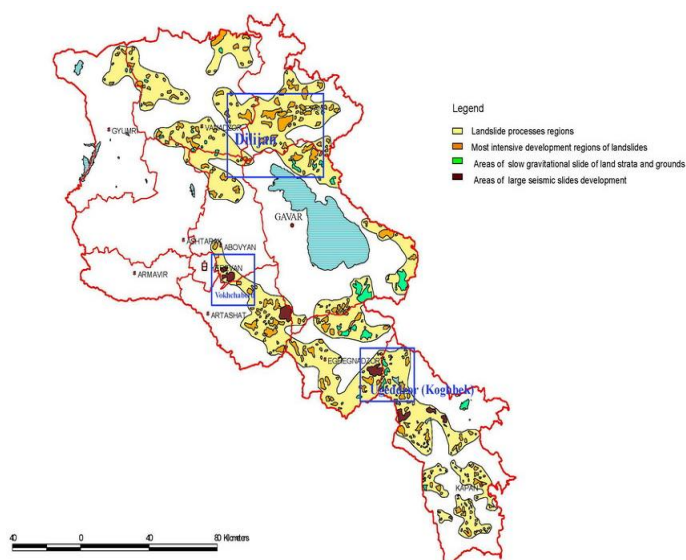
4.4.3. Геоложки характеристики на Армения

Армения се намира в сеизмично активен полумесец, който се простира от Алпите, през Кавказ и Централна Азия към Руската федерация, заедно с Турция и други земетръсно застрашени страни. Значителната опасност от земетресения се дължи на взаимодействието на основните тектонични плочи. "Индийската" и "Арабската" тектонични плочи се движат на север, сблъсквайки се с тектоничната плоча на "Евразия". В резултат на този непрекъснат процес се създават най-големите планински вериги от Кавказ до Хималаите.

4.4.4. Свлачища и наводнения в Армения

Свлачищните обекти в Република Армения (*Фиг. 88*) покриват около 122000 хектара, което е 4,1% от общата територия на страната, около 35% от населените места са разположени на свлачищни райони [152], [153]. 233 общности (около 25%) са засегнати от свлачища, според едно скорошно проучване от Японската агенция за

международно сътрудничество - *Japan International Cooperation Agency* [154]. Свладищата са активни в повече от 100 общности и засягат стотици жилищни сгради, комуникационна инфраструктура и жизненоважните съоръжения, включително 1744 хектара - 5,2% от общите жилищни площи, 240 км пътища / магистрали -3,2% от общия и 4.8 км на железниците -0,5% от общия брой.



Фиг. 88. Свладищни райони с високо ниво на риск в Армения.

Следните дейности са извършени от изследователите в проекта:

- Идентифициране и подбор на областите на Армения, които са най-изложени на сеизмичен и свладищен риск;
- Проучване на геоложките и морфологичните структури на избрани области;
- Изследване на топографска и геодезическа информация на рисковите зони, преди и след бедствието, както и изследване на военни топографски карти [155], [156] на бившия СССР (средни мащаби от 1:200000 до 1:1000000, и малки мащаби от 1:1000000);
- Изучаване на голям брой научно-техническа литература, технически доклади и геоложки карти за наблюдение.

В резултат на това проучване бе решено, че е необходимо да се използва инструменти от системите SAR на ESA, за проучване на територии - свладища, които са най-активни и са опасни за населението и инфраструктурата на дадена област, както следва: Dilijan, Voghchaberd, Ughedzor (Kochbek) – Табл. 26 и земетръсна зона Spitak [157], [158], [159] 1988.

Name of landslide	Latitude (Northern breadth)	Longitude (East longitude)
Voghchaberd	40° 10' 00"	44° 39' 10"
Dilijan	40° 45' 10"	44° 53' 15"
Ughedzor (Kochbek).	39° 41' 00"	45° 43' 00"

Табл. 26. Координати на най-активните свладища в Армения.

4.4.4.1. Свлячище Voghchaberd

Това свлячище е блок с размер 2.5 x 1.3 км и 70-80 м средна мощност, породено от стръмния склон на билото на планината със същото име и преминаващо по пътя край село Voghchaberd. Тук палеогенските отлагания са до Неогена. Югоизточно крило на нарушението е издигнато. Амплитудата на вертикално преместване на блока е приблизително 200-225 m, в някои случаи по значително (*до 1 km*) хоризонтално издърпване на свлячищното тяло. Това преобладаване на хоризонтална компонента спрямо вертикалната доказва сеизмологичното естество на това свлячище. Пътят край село Voghchaberd (Фиг. 89) е непрекъснато деформиран. Интензивно е разрушаването на селския район, сградата на училището и повече от 44 къщи са напълно унищожени, както и повече от 80% от жилищните къщи са в аварийно състояние. Първите щети, причинени от свлячищните движения в село Voghchaberd са били регистрирани още през 1982 г., но през последните години след земетресение Spitak, те са станали активни отново и превземат нови участъци от селото. Скоростта на плъзгане на отделни райони е няколко милиметра на ден. Движенията се засилват след пролетното топене на снега и дъждовете, тъй като интензивното овлажняване води до хлъзгава повърхност, която активизира свлячището през този период. Тук, 1030 души (430 семейства) тревожно чакат съдбата си в резултат на съществуващото непрекъснато положение на тревога.



Фиг. 89. Изглед на път, след свлячище.

4.4.4.2. Свлячище Dilijan

Свлячищата на територията на град Dilijan обикновено са развити по десния склон на долината на река Aghstev. Тук се отличават повече от 160 свлячищни проявления с различна интензивност и размери [160].

Поколенията от свлячища в Dilijan се обуславят от редица фактори, както следва:

- Сложен геоморфологичен и геоложки състав на територията на града;
- Състава на скалите и интензивните атмосферни влияния, силно раздробяване и фрагментация;
- Широко разпространение на подпочвени води и техните разкрития;
- Диференцирани движения на неотектонски блокове по протежение на

фрагментацията;

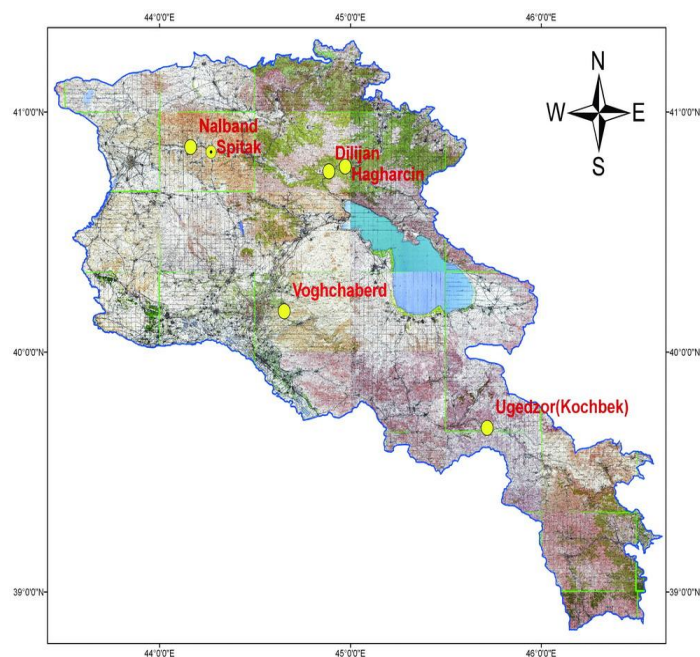
- Увеличаване на скалното теглото на склонове, в резултат на овлажняване от атмосферни валежи, прекомерно поливане на земеделски земи и изтичане на вода от различни шлюзове;
- Изрязване и претоварване на склоновете поради строителство на пътища, тежки сгради и др.

В продължение на 4 години е била регистрирана минимална плъзгаща зона "*Rotonda*" (0,6 cm), и максимална плъзгаща площ "*Jroger*" (61,6 cm). Плъзгането на масите става по-активно след земетресението Spitak от 1988 г. и особено след разпадането на СССР, когато е спряло финансирането на мерките за предотвратяване на свлачищни явления. В резултат на това, територията на град Dilijan е по-скоро в състояние на: разкъсвания, появяващи се по улиците и по различните конструкции вследствие натиска на плъзгащите се маси.

4.4.5. Създаване на цифрови модели на релефа за избрани територии в риск

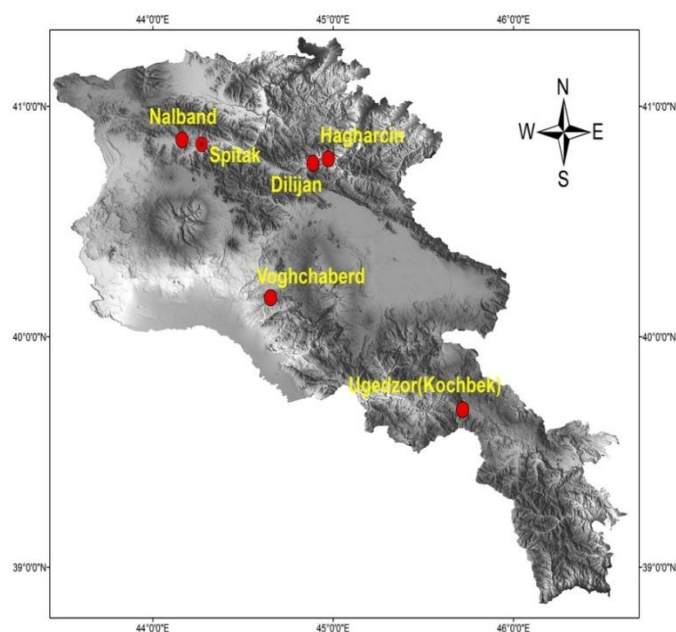
Топографска карта в мащаб 1:100 000 на територията на Армения [155], [156] е взета като база за създаване на цифрови карти на релефа с висока степен на свлачища и други земни деформации, причинени от земетресения (*Dilijan; Voghchaberd; Ughedzor , Kochbek*) и Spitak [157], [158], [159] - земетръсна зона). Картата е създадена с проекция "Гаус Крюгер" в координатна система "Polkovo 1942yr". Прекъсванията между хоризонталите са 20 м. Вертикално заснемане на територията на Армения не е било правено през последните 25-30 години, с изключение на някои локални територии.

Растр на топографската карта на Армения в размер 1:100000 е използвана за обща ориентация, която е въведена в среда ArcGIS Desktop 9.3 чрез сканиране на отделни части от цифрови растрни изображения (Фиг.90). Картата е геореферирана с проекция "Гаус-Крюгер" в координатна система "Polkovo 1942yr". Отделени от картата са Dilijan, Voghchaberd, Ughedzor (*Kochbek*) свлачища и Spitak земетресението в област от (100 x 100 км), като са преобразувани и представени в "WGS 1984".



Фиг. 90. Растер на топографската карта на Армения в размер 1:100000.

За създаването на цифрови модели на релефа на териториите в риск е използван цифров модел на релефа на Армения (Фиг.91), взет от *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* [161] инструмента на сателита Terra (достъпен за 99% от Земята), който представя височината с резолюция 30 метра [162], [163], [164].

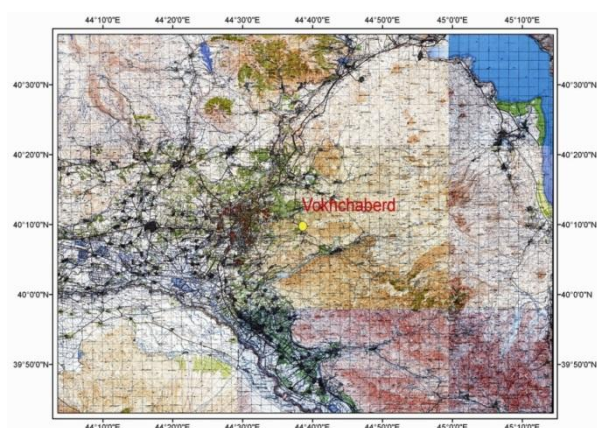


Фиг. 91. Цифров модел на релефа на Армения.

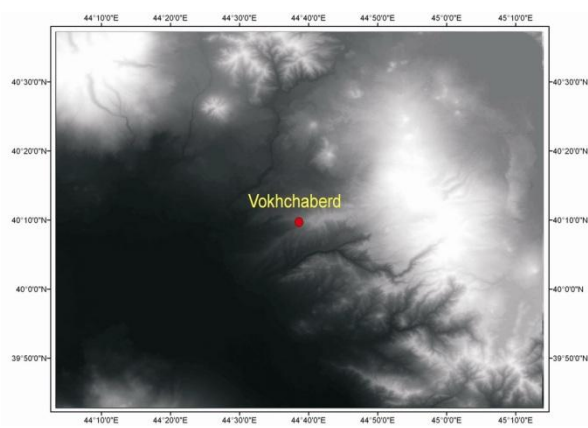
Цифров модел на релефа на Армения е също наличен в „WGS 1984“ *Geocentric Coordinate System*. За отстраняване на грешки, алгоритми и програми за генериране на интерферограми и диференциални интерферограми, за избрани области и модели за обработка на сигнала на SAR (за *топографска интерферометрия*), са разработени в

рамките на проекта, от авторите на DEM на Армения са избрани области в съответствие с рисковите области, с помощта на същия принцип, който е приложен при обработката на топографските карти на Армения.

За свлачището Voghchaberd по топографска карта на Армения [155], [156] беше избрана площ от 100 x 100 км (Фиг.92) около свлачището на следните координати: ширина: 40°10' 00" и дължина: 44°039' 10". След което от цифровият модел на релефа на Армения с използването на: ArcToolbox, Data Management Tools, Raster, Raster Processing Clip tools от инструментариума на "ArcGis version ArcMap9.3" е получен част от цифровия модел на релефа, отговарящ на избрания район (Фиг.93).

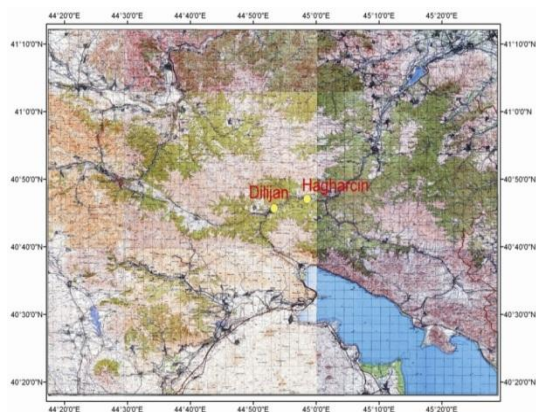


Фиг. 92. Свлачище Voghchaberd на топографската карта на Армения.

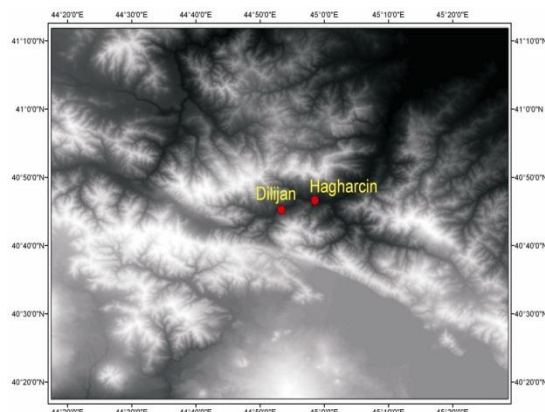


Фиг. 93. Цифров модел на релефа на свлачището Voghchaberd.

За свлачището Diliĵan по топографска карта на Армения [155], [156] беше избрана площ от 100 x 100 км (Фиг.94) около свлачището на следните координати: ширина: 40°45' 10" и дължина: 44°043' 15". След което от цифровият модел на релефа на Армения с използването на: ArcToolbox, Data Management Tools, Raster, Raster Processing Clip tools от инструментариума на "ArcGis version ArcMap9.3" се получи част от цифровия модел на релефа, отговарящ на избрания район (Фиг.95)



Фиг. 94. Свлачище Dilijan на топографската карта на Армения.

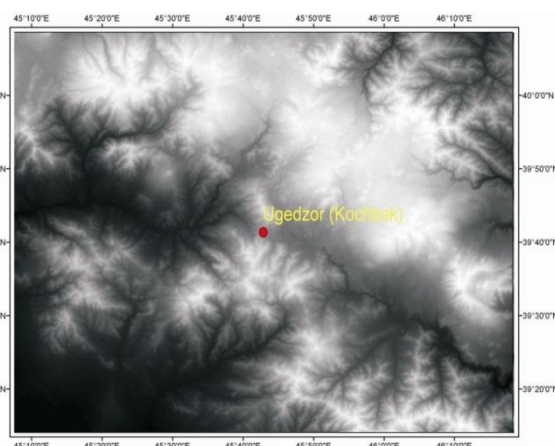


Фиг. 95. Цифров модел на релефа на свлачището Dilijan.

За свлачището Ughedzor (Kochbek) от топографска карта на Армения [155], [156] беше избрана площ от 100 x 100 км (Фиг.96) около свлачището на следните координати: ширина: 39041' 00" и дължина: 45043' 00". След което от цифровият модел на релефа на Армения с използването на: ArcToolbox, Data Management Tools, Raster, Raster Processing Clip tools от инструментариума на "ArcGis version ArcMap 9.3" се получи част от цифровия модел на релефа, отговарящ на избрания район (Фиг.97).

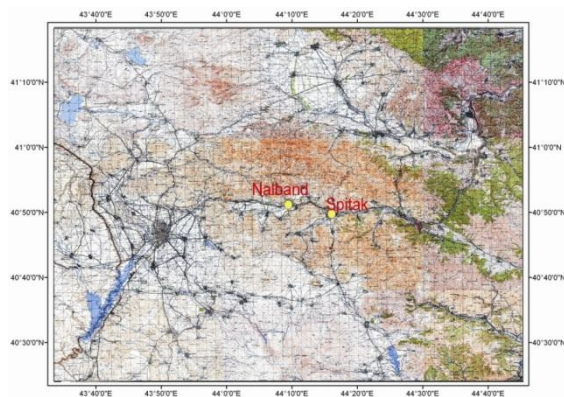


Фиг. 96. Свлачище Ughedzor (Kochbek)на топографската карта на Армения.

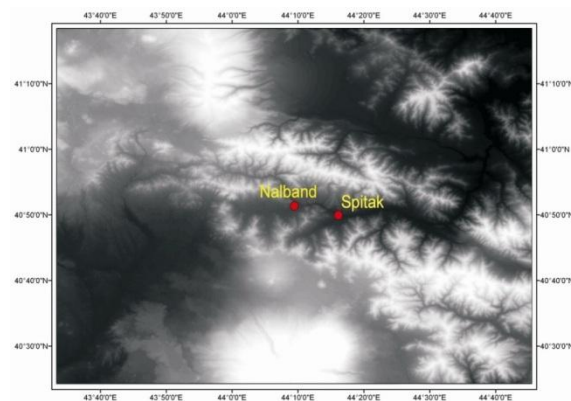


Фиг. 97. Цифров модел на релефа на свлачището Ughedzor (Kochbek).

За свлачищната зона на земетресението Spitak [157], [158], [159] от топографска карта на Армения [155], [156] беше избрана площ от 100 x 100 km (Фиг.98) около свлачището на следните координати: ширина: 40054' 00" и дължина: 44013' 12". След което от цифровият модел на релефа на Армения с използването на: ArcToolbox, Data Management Tools, Raster, Raster Processing Clip tools от инструментариума на "ArcGis version ArcMap9.3" се получи част от цифровия модел на релефа, отговарящ на избрания район (Фиг.99).



Фиг. 98. Свладищна зона на земетресението Spitak на топографската карта на Армения.



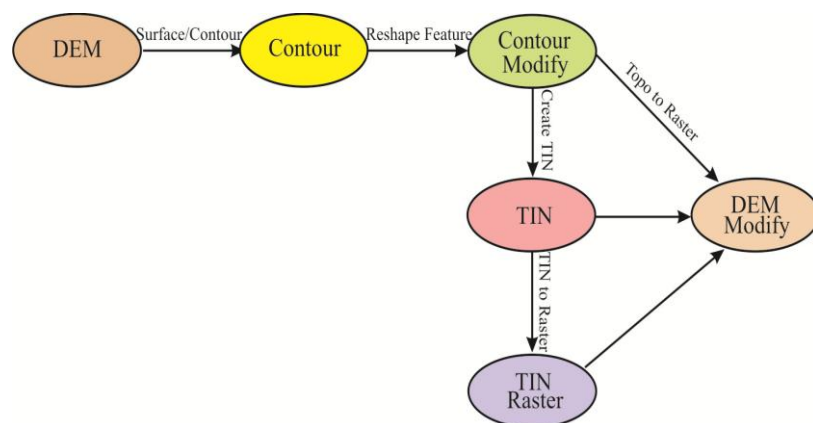
Фиг. 99. Цифров модел на релефа на свладищната зона на земетресението Spitak.

С цел генерирането на синтезирани интерферограми и синтезирани диферентни интерферограми е симулирано земно изместване, причинено от естествени природни бедствия в избраните райони с високо ниво на риск.

В рисковите зони са избрани свладищата, които зависят от релефа, местната геоложката структура и свойства на композитните скали. Избраните свладищни райони от 20x20 км зона, са изрязани от областта 100x100 км на цифровия модел на релефа, защото не е възможно да се създаде модифициран цифров модел на релефа за цялата територия.

Всички операции са изпълнени с помощта на ArcGis Desktop 9.3 и широко използваните инструменти: ArcMap, ArcToolBox, Spatial Analyst Tools и 3D Analyst Tools. С помощта на Spatial Analyst Tools/Surface/Contour инструмента от цифровия модел на релефа, за всички избрани рискови райони са получени хоризонтални контурни линии с интервал 10 m (размер на клетката) за областите, които трябва да бъдат местени. След това на базата на изместените контури е получен модифициран цифров модел на релефа, чрез инструментите показани на Фиг.100.

Изместените части в районите Dilijan и Hagharcin (съответстващи координати на техните центрове: 40° 45' 08"; 44° 53' 04" и 40° 46' 18"; 44° 58' 27") се намират в дясно от реката Aghstev, където изместванията са насочени на север. Изместените части в района Ughedzor (Kochbeg) (съответстващи координати на неговия център: 39° 40' 49"; 45° 42' 45") се намират от дясната страна на високоскоростен път Vaugh-Sisian, където тези измествания са насочени на: север, североизток. Изместените части в района Voghchaberd (съответстващи координати на техните центрове: 39° 40' 49"; 45° 42' 45") са на 0.7 km на изток, североизток от селото Voghchaberd. Изместените части на зоната на земетресението Spitak [157], [158], [159] (съответстващи координати на техните центрове: 40° 52' 30"; 44° 10' 58") са на 3 км разстояние на изток от село Nalband и 8 км на северозапад от град Spitak, като изместването е насочено на юг.



Фиг. 100. Граф на генерирането на модифициран цифров модел на релефа.

4.4.6. Изводи

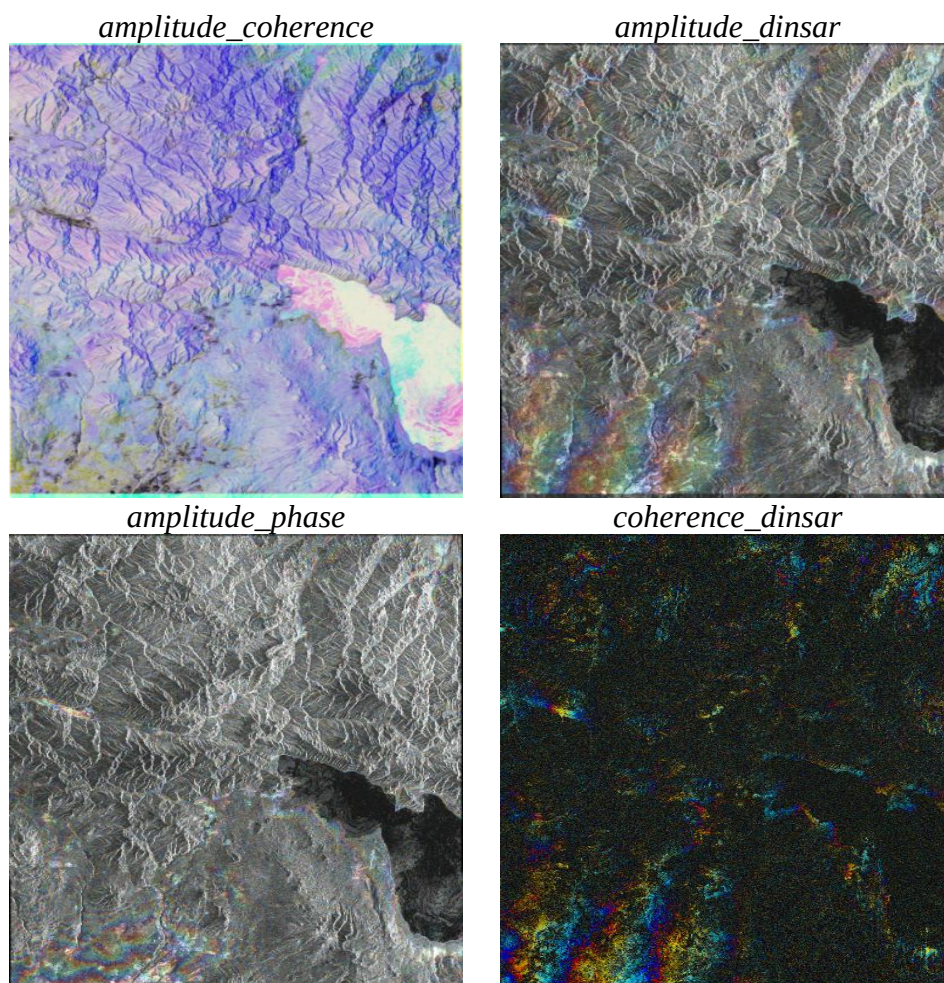
Полученият цифров модел на релефа може да бъде използван за генериране на синтезирани интерферограми и диферентни интерферограми, а също така за моделиране на SAR изображения в наблюдаваните райони на интерес. При разработване на цифров модел на релефа, математически модели могат да бъдат приложени за: формиране на SAR изображението, стъпките на интерферометричния процес на обработката, SAR интерферограма за оценка на топографията и диферентна интерферограма за оценка на земното изместване.

4.5. Верификация на интерферограми чрез съпоставяне с друг източник

Задача: Изследване на интерферограмите, осигурени от българската работна група, които са получени от обработката на изображения от сателита ENVISAT на някои части от територията на Армения. Да се потвърди или отхвърли точността на свлачища, посочени от спътниковите данни в тези части. Те наистина ли се случват в Армения?

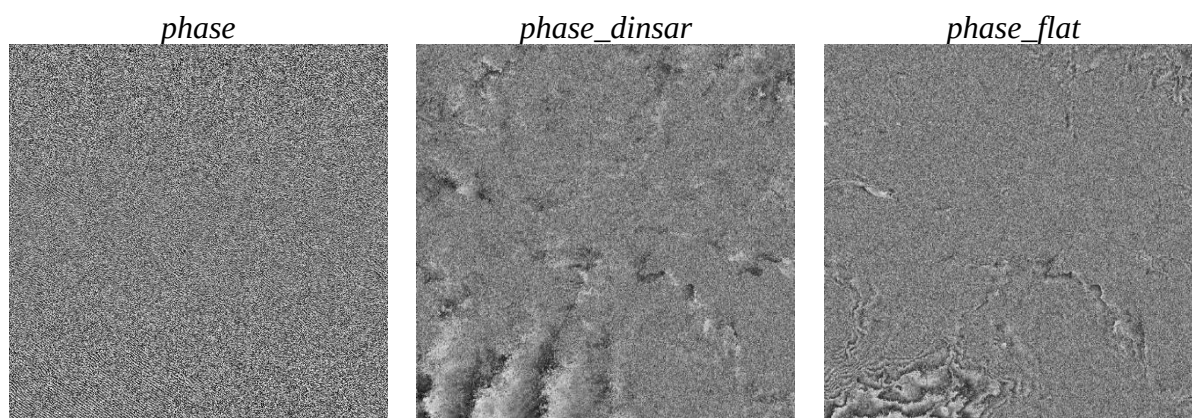
В резултат от обработката на сателитните изображения от 2008 – 2009 година (които са получени както следва: 30/08/2008, 04/10/2008, 11/07/2009 и 28/11/2009) и топографската информация от софтуерният инструмент - *InSAR and Observation Tool* [143], българската работна група осигури 12 интерферограми и 4 диферентни интерферограми. За цялата 2008 и 2009 година бяха осигурени 48 интерферограми и диферентни интерферограми, които са получени посредством различни комбинации на сателитните изображения.

На първо място арменската работна група извърши визуална оценка на всички тези интерферограми и диферентни интерферограми ("amplitude_master", "amplitude_slave", "amplitude_rgb", "coherence", "amplitude_coherence", "phase", "phase_flat", "phase_dinsar", "amplitude_dinsar", "amplitude_phase", "amplitude_topography", "coherence_dinsar" и др.). Впоследствие са избрани интерферограми (Фиг.101) направени през 2008-2009 г., където е наблюдавано най-сбито натрупване на цвят (amplitude_coherence, amplitude_dinsar, amplitude_phase, coherence_dinsar).



Фиг. 101. Интерферограми с най нехомогенен цветен ефект.

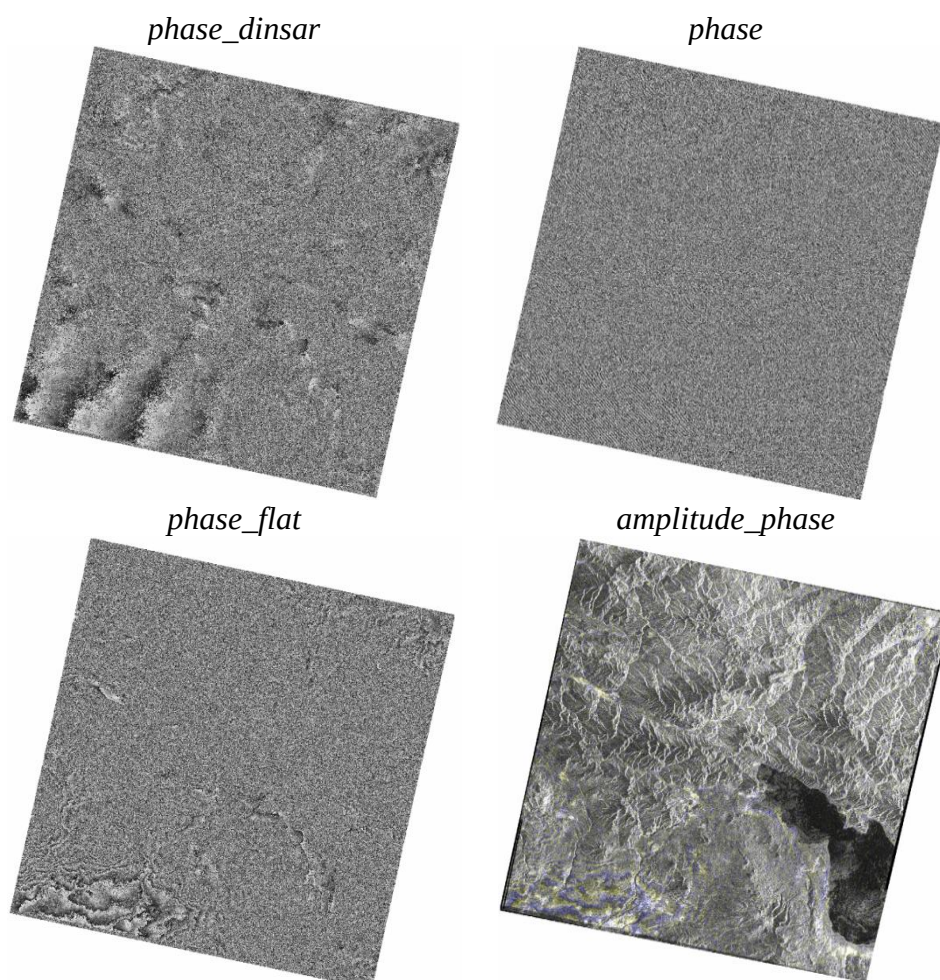
На следващата стъпка от проучването, интерферограмите "phase", "phase_flat" и "phase_dinsar", от които бяха избрани тези части, съответстващи на интерферометричните кръгове, отговарят на нехомогенните части в цветните изображения (*amplitude_coherence*, *amplitude_dinsar*, *amplitude_phase*, *coherence_dinsar*) – Фиг.102.



Фиг. 102. Интерферограми с интерферометрични кръгове.

После интерпретирани изображения на интерферограмите бяха избрани с визуално сравнение ("amplitude_coherence", "amplitude_dinsar", "amplitude_phase",

"coherence_dinsar", "phase, phase_flat", "phase_dinsar"). Инструментът *Observation Tool (IDIOT)* не изпълнява геокодиране на изображенията, затова арменски участниците в групата георефериха избрани изображения, с помощта на ArcGIS 9.3 и ги поставиха в координатна система WGS 1984 г. (Фиг.103).

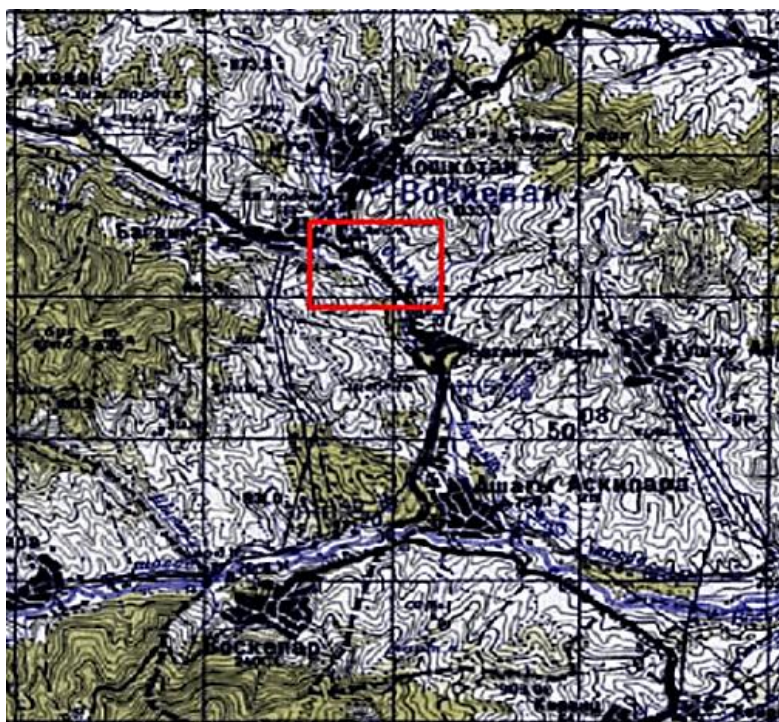


Фиг. 103. Геореферирани интерферограми.

Според данните, предоставени от отдел "Население и защитени зони" на министерство на извънредните ситуации в Армения през 2008 година са регистрирани 5 свлачища, а през 2009 година 9 на брой. Обаче, по време на периода на нашето изследване (30.08.2008, 04.10.2008, 07.11.2009 и 28.11.2009) е записано само едно свлачище на 6-ти км на магистралата на Voskepar-Baghanis (дължина 9 м, ширина 30 м и дълбочина 50 м). На топографска карта на Армения (Фиг.104) зоната на свлачището на 6-км от магистралата на Voskepar-Baghanis, е избрана по следните координати (Табл. 27).

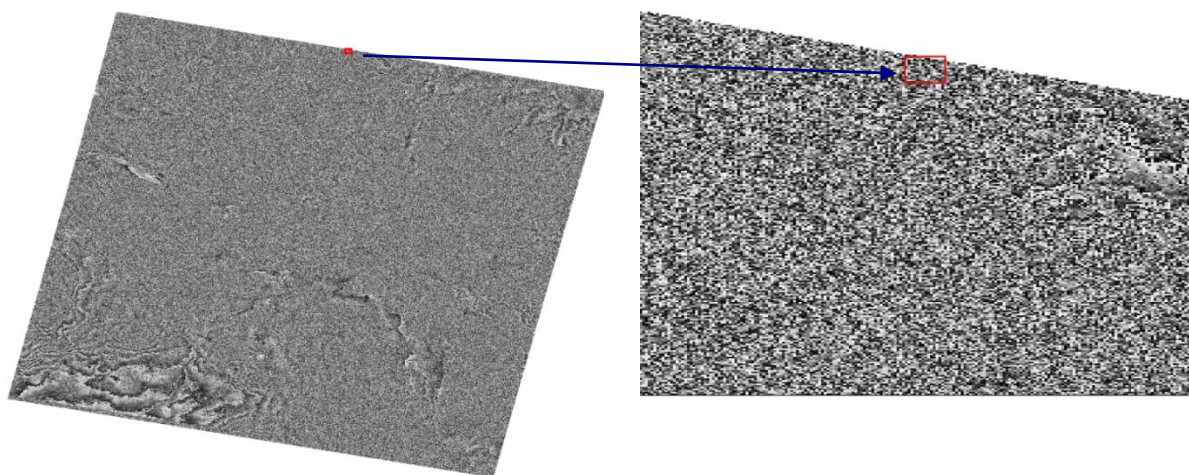
X	Y
45.059712	41.100587
45.059712	41.111586
45.076418	41.111586
45.076418	41.100587

Табл. 27. Геокоординати на свлачището на 6-км от магистрала Voskepar-Baghanis.



Фиг. 104. Топографска карта на свлачището на 6-км от магистрала Voskepar-Baghanis, в размер 1:100000.

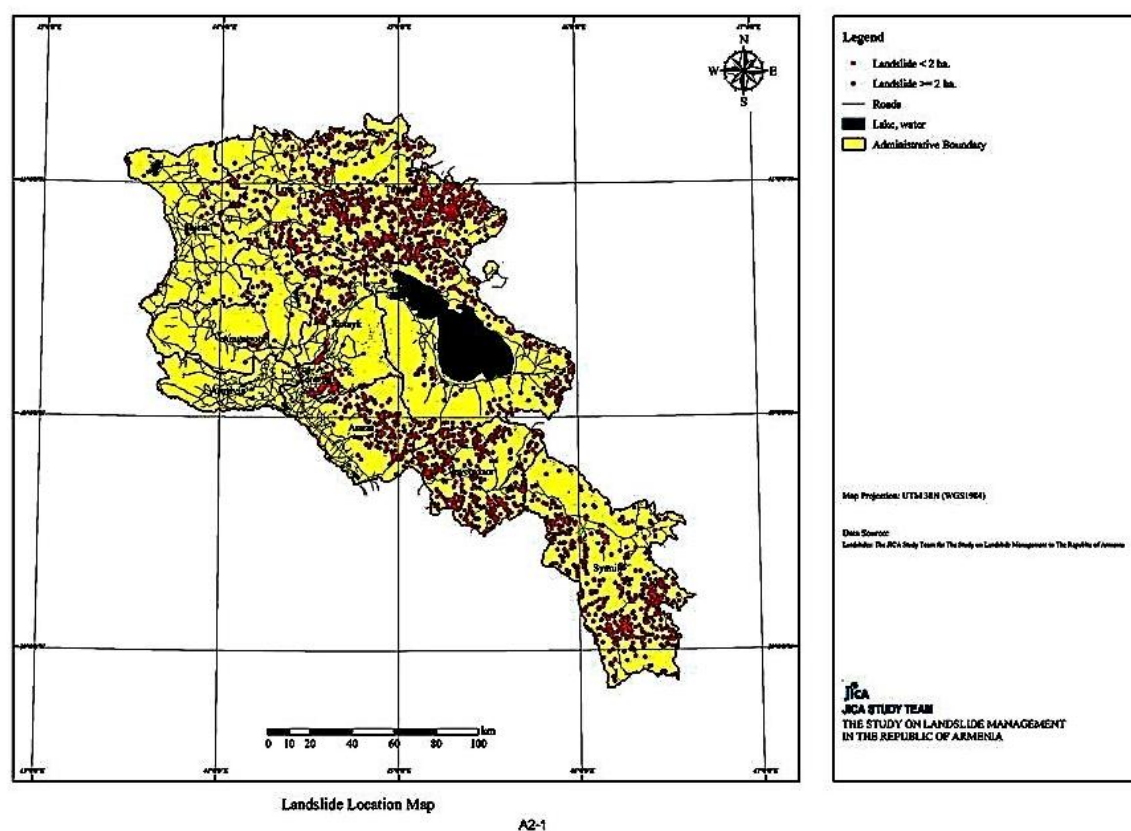
В резултат от сравнение за избраните зони на интерферограми и диферентни интерферограми, не са записани никакви интерферометрични кръгове (Фиг.105). С други думи, на интерферограмите не е регистрирано свлачището, което се е случило на 6 км от магистралата на Voskepar-Baghanis.



Фиг. 105. Свлачището на 6-км от магистралата Viskepar-Baghanis, комбинирана с плоската интерферограма.

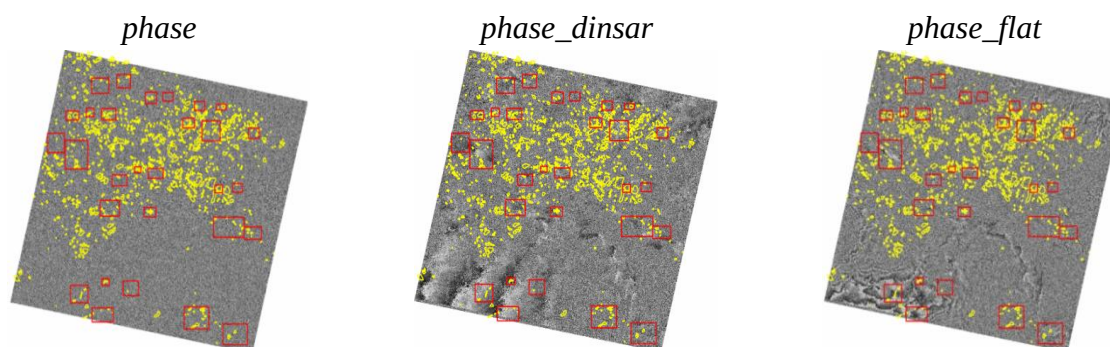
Най-пълното и точно изследване на територията на Армения в областта на свлачищата е извършено през 2004-2005 година от организацията *Japan International Cooperation Agency* [154] (Фиг.106). Основно чрез използване на географски информационни системи (GIS), участниците от арменската група сравниха

геореферирани изображения и визуално избраха зони на свлачищни явления, които са във формата на JICA за територията на Армения.



Фиг. 106. Свлачищни явления в Армения според изследването на организацията JICA.

В резултат от това сравнение някои избрани части от геореферираните интерферограми напълно съвпадат със свлачищните зони, определени от работния екип на JICA (Фиг.107).



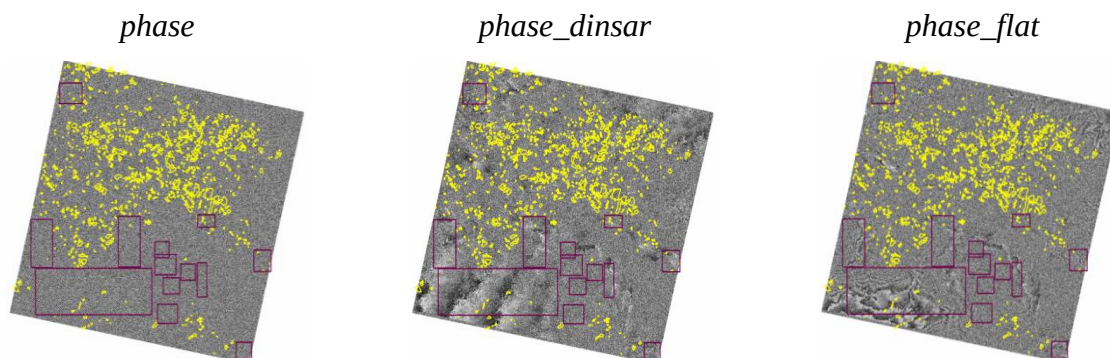
Фиг. 107. Зони с пълно съвпадение на свлачищни явления, според JICA.

В следващата Табл.28 са описани геокординатите на записаните свлачищни зони (избраните зони на Фиг.107 са номерирани последователно отгоре надолу, отлясно наляво 1.1, 1.2, ..., 1.29).

NUMBER	X_LEFT	Y_BOTTOM	Y_TOP	X_RIGHT	Y_BOTTOM	Y_TOP
1.1	44.619488	41.037323	41.096781	44.707043	41.037323	41.096781
1.2	44.748207	41.058885	41.109849	44.817467	41.058885	41.109849
1.3	44.892664	40.999514	41.042274	44.949402	40.999514	41.042274
1.4	44.980543	41.007905	41.041619	45.032348	41.007905	41.041619
1.5	45.14164	40.971877	41.007031	45.19437	40.971877	41.007031
1.6	45.253113	40.974653	40.996855	45.301218	40.974653	40.996855
1.7	44.490294	40.935525	40.96929	44.554587	40.935525	40.96929
1.8	44.592935	40.948223	40.98091	44.632406	40.948223	40.98091
1.9	44.67082	40.935577	40.978946	44.743225	40.935577	40.978946
1.10	45.081381	40.904436	40.942056	45.140587	40.904436	40.942056
1.11	45.179832	40.854457	40.931963	45.271871	40.854457	40.931963
1.12	45.415003	40.864105	40.903883	45.468658	40.864105	40.903883
1.13	44.395448	40.809124	40.883043	44.482548	40.809124	40.883043
1.14	44.486289	40.746003	40.855969	44.600274	40.746003	40.855969
1.15	44.723393	40.681075	40.723474	44.798298	40.681075	40.723474
1.16	44.83664	40.732567	40.754238	44.869617	40.732567	40.754238
1.17	44.906179	40.709812	40.747971	44.982969	40.709812	40.747971
1.18	45.24358	40.654046	40.684265	45.28305	40.654046	40.684265
1.19	45.334855	40.655896	40.689816	45.38481	40.655896	40.689816
1.20	44.663643	40.564405	40.624728	44.760539	40.564405	40.624728
1.21	44.88465	40.561428	40.596695	44.945923	40.561428	40.596695
1.22	45.237033	40.482583	40.560599	45.393065	40.482583	40.560599
1.23	45.393421	40.474746	40.522838	45.481768	40.474746	40.522838
1.24	44.512319	40.230316	40.297931	44.600982	40.230316	40.297931
1.25	44.670486	40.29764	40.324108	44.709492	40.29764	40.324108
1.26	44.78037	40.257947	40.314786	44.857708	40.257947	40.314786
1.27	44.622525	40.157048	40.210667	44.728543	40.157048	40.210667
1.28	45.089577	40.129793	40.214706	45.213828	40.129793	40.214706
1.29	45.285508	40.06887	40.148446	45.409759	40.06887	40.148446

Табл. 28. Гео координатите на записаните свлачищни зони.

Някои райони на интерферограмите се намират в близост до свлачищни зони други са доста далеч от тях (Фиг.108). Това може да е вследствие на някои агрикултурни дейности или строеж на пътища, а може да са неясноти, породени по време на интерферометричната обработка.



Фиг. 108. Зони далеч от свлачищните явления.

Координатите на райони който не съвпадат със свлачищните са дадени в Табл. 29. (Избраните зони на Фиг.108 са номерирани последователно отгоре надолу и отляво надясно, както следва 2.1, 2.2, ..., 2.13).

NUMBER	X_LEFT	Y_BOTTOM	Y_TOP	X_RIGHT	Y_BOTTOM	Y_TOP
2.1	44.463423	41.038985	41.118229	44.579102	41.038985	41.118229
2.2	44.317286	40.406693	40.591936	44.428432	40.406693	40.591936
2.3	44.764598	40.409512	40.604572	44.876456	40.409512	40.604572
2.4	45.170417	40.561668	40.60976	45.258763	40.561668	40.60976
2.5	44.965747	40.191765	40.265336	45.067474	40.191765	40.265336
2.6	45.458612	40.392455	40.47439	45.546959	40.392455	40.47439
2.7	44.340058	40.22356	40.403421	44.936215	40.22356	40.403421
2.8	44.951327	40.378581	40.457329	45.059605	40.378581	40.457329
2.9	45.168483	40.293204	40.425305	45.216931	40.293204	40.425305
2.10	45.368115	40.052798	40.119103	45.447135	40.052798	40.119103
2.11	44.951818	40.445236	40.505802	45.024498	40.445236	40.505802
2.12	45.083823	40.357981	40.420652	45.159653	40.357981	40.420652
2.13	44.994257	40.304442	40.367972	45.078374	40.304442	40.367972

Табл. 29. Райони, които не съвпадат със свлачищните.

Всички споменати изследвания са извършени с помощта на интерферограмите от 2009 година, а също и с комбинираните интерферограми 2008-2009 година. Акумулираните нехомогенните цветни ефекти в интерферограмите (“amplitude_coherence”, “amplitude_dinsar”, “amplitude_phase”, “coherence_dinsar”) и “phase, phase_flat”, “phase_dinsar”), където интерферометричните кръгове са забелязани, са ексклузивно изразени в комбинираните интерферограми 2008-2009 година.

4.6. Изводи

Предложените математически модели са приложени върху реални данни, за района Дилижан в Армения, където отново чрез математически изчисления са получени резултати, позволяващи да се изчисли разтеглената фаза и интерферометричната фаза представени с интерферометричните кръгове в един малък район. Показани са фигури на разстоянията от две, различно намиращи се РЛССА до повърхността на района Дилижан в Армения и фигури на разстелената фаза, и интерферометричната фаза. По данни от измерванията и изчисленията, които бяха направени на базата на четири комплексни интерферометрични образа, получени от Европейската агенция за космически изследвания и резултатите от наблюденията на колектива от Армения – Ереванския държавен университет, бе направено съпоставяне на данните - изображенията с конкретните измервания на геодезични карти на територията на Армения. Резултатите, които са използвани, са на базата на резултати получени от екип на Японския институт за геодезични измервания, при които сравнителните данни и означените местности показват едно сравнително добро съвпадение на предвидените от нас промени на повърхността на територията на Армения и тези които са измерени от колегите от Япония.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

5.1. Обобщение на съдържанието на дисертационният труд

В глава 1 "анализ и оценка на системите, методите и алгоритмите за сателитно дистанционно изследване на земната повърхност" е направен анализ на: методите и техниките на интерферометричната обработка на сателитни изображения. Обособени са ключовите моменти при използването на технологията, включително: определянето на базовите линии, регистрацията на изображенията, разстилането на фазата, кохерентност, обработката на грешки, приложения и симулатори. Направен е анализ и оценка на съвременното състояние на научната литература в областта, системите, методите и алгоритмите за сателитно дистанционно изследване на земната повърхност.

В глава 2 "математическо моделиране на процеса на получаване на комплексно SAR изображение на земната повърхност" са разгледани SAR сигнали с линейна честотна модулация и SAR детерминиран модел. Представен е SAR модел на процеса на изобразяване. Дадено е SAR геометрично описание. Предложен е математически модел на SAR сигналите отразени от наблюдаваната повърхност. Предложен е алгоритъм за възстановяване на образа на повърхността. Реализиран е числен експеримент, включващ: алгоритъм за моделиране на SAR сигнали, изчисляване на време закъснение на импулсите, формиране на сигналът и алгоритъм за възстановяване на комплексното изображение от комплексният SAR сигнал.

В глава 3 "математическо моделиране на процеса за получаване на комплексна интерферограма" е разработен математически модел на процеса на формиране на InSAR сигнал. Представена е геометрия на InSAR и измерване на движението на терена чрез диферентна интерферометрия. Разгледани са техниките: корегистрация и кохерентност. Представен е математически модел на квази диферентни интерферограми, чрез конструиране на повърхността и прилагане на ефект на деформация. Приложен е алгоритъм за възстановяване на образа от комплексно SAR изображение и изчисляване на кохерентната карта и интерферограмата. Извършено е числено моделиране на квази интерферограми с ефективна подпикселна крос-корелационна корегистрация. Моделирана е земна повърхност и последвала деформация на района, данните са съхранени в GEO-TIFF файлове. Симулирана е мулти сателитна интерферометрична система използваща радио локационна система със синтезирана апертура. Извършено е преднамерено изместване на фазовия образ, след което е приложен метод за корегистрация и е получена диферентна интерферограма. Реализирани са четири цифрови експерименти демонстриращи предложената методология.

В глава 4 "натурни експерименти с реални сателитни изображения" са извършени пет експеримента с реални сателитни данни. В изследването "синтез на интерферограма, базирана на цифров модел на релефа от района Dilijan в Кавказ, Армения" е представено географско описание на изследвания район и са описани алгоритъмът и програмирането. В изследването "свлачищни явления в национален парк Севан - Армения" е представена областта на проучването и използвани данни,

изследвани са свлачищни явления в района на езерото Севан и са демонстрирани експериментални резултати. В изследването "INSAR изследване на свлачища в района на езерото Севан - Армения" е представено геологическо описание на района на езерото Севан, въведение и цел на изследването, основни интерферометрични характеристики, описание на данните и инструмента, приложен е цифров модел на релефа и в резултат са получени изображенията на интерферометричното изследване. В изследването "цифрови модели на релефа на рискови територии в Кавказ - Армения" са представени геоложки характеристики на Армения, свлачища и наводнения в Армения, и е демонстрирано създаването на цифрови модели на релефа за избрани територии в риск. В изследването "верификация на интерферограми чрез съпоставяне с друг източник" е извършен анализ на интерферометрични данни и е извършена съпоставка на резултатите с тези получени от екип на Японския институт за геодезични измервания, които показват едно сравнително добро съвпадение на предвидените промени на повърхността.

5.2. Публикации свързани с дисертационния труд

- Andon Lazarov, Dimitar Minchev, Comparison analysis of ESA software products and their functionality for interferometric processing., Burgas, Bulgaria, XVI-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, ISBN 978-954-323-530-8, SIELA 2009 Proceeding, p.165-174, 2009.
- Andon Lazarov, Dimitar Minchev, SAR mapping equations and coordinate transformations., Burgas, Bulgaria, XVI-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, ISBN 978-954-323-530-8, SIELA 2009 Proceeding, p.175-180, 2009.
- Andon Lazarov, Dimitar Minchev, Gurgen Aleksanyan, Maya Ilieva, Landslide phenomena in sevan national park – Armenia., 28 June – 2 July 2010, Bergen, Norway, ESA Living Planet Symposium 2010 Proceedings SP-686, ISBN 978-92-9221-250-6, ISSN 1609-042X, 2010.
- Andon Lazarov, Dimitar Minchev, INSAR study of landslides in the region of lake Sevan– Armenia, 19-23 September 2011, Frascaty, Italy, ESA Fringe 2011 Proceedings SP-697, ISSN 978-92-9092-261-2, ISSN 1609-042X, 2011.

5.3. Аprobация на резултатите

Основните теоретични и експериментални резултати са изложени в 4 публикации, две от тях през 2009 в XVI-th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies – Бургас, България, а другите две съответно в международни научни конференции: 28 June – 2 July 2010, Bergen, Norway, ESA Living Planet Symposium 2010 и 19-23 September 2011, Frascaty, Italy, ESA Fringe 2011.

5.4. Основни научно и научно-приложни приноси в дисертационния труд

5.4.1. Научни приноси

- Предложен е аналитико-геометричен и кинематичен модел на SAR сценария (1-5) и алгоритъм за формиране на линейно честотно SAR сигнал с линейно честотна модулация (6-11).
- Предложен е алгоритъм за възстановяване на комплексното SAR изображение, базиращ се на двумерна обратна Фурие трансформация (12) и реализиран с бързо инверсно преобразование на Фурие в среда на MATLAB (13).
- Разработен е математически модел на процеса на получаване на комплексно SAR изображение на базата на геометричен модел на релефа на сложна земна повърхност (3), умножение на многомерни масиви за формиране на комплексния отразен сигнал (15-19) и двумерна Фурие трансформация за възстановяване на комплексния SAR образ.
- Разработен е алгоритъм за получаване на комплексна интерферограма на базата на две комплексни SAR изображения, който включва подпикселна кроскорелационна корегистрация и комплексно спрегнато умножение на корегистрираните комплексни образи, изрази (37-42).
- На базата на геометрично-кинематичния модел на мулти сателитна SAR система е разработен математически модел на процеса и алгоритъм за получаване на комплексна интерферограма и диферентна интерферограма на сложна повърхност.
- Предложен е алгоритъм за ефективна подпикселна корегистрация чрез корелация, реализирана чрез двумензионна бърза Фурие трансформация на две комплексни изображения.

5.4.2. Научно-приложни приноси

- Разработен е алгоритъм и програмен продукт за реализиране на математическия модел на процеса за формиране на комплексен SAR сигнал, адаптивен за траекторните параметри на сателита и геометрията на наблюдаваната повърхност и динамиката във времето на закъснението на импулсите от отделните фрагменти на повърхността.
- Разработен е алгоритъм и програмен продукт за реализиране на математическия модел на процеса за формиране на комплексни SAR изображения, чрез прилагане на дву димензионно Фурие трансформация за определяне на интензивностите на отделни блестящи точки (отражатели) от земната повърхност.
- Разработен е алгоритъм и програмен продукт за реализиране на комплексна SAR интерферограма и диферентна интерферограма на базата на теоретични моделни данни за релефа на сложна земна повърхност.
- На базата на реални данни за комплексни изображения, получени чрез сателита ENVISAT и използване на продукти и софтуер на: Европейската агенция за космически изследвания, Берлинския университет, Технически Университет Делфт, Университета в Райс, Националната аерокосмическа агенция на Съединените американски щати, Shuttle Radar Topography Mission, Японския институт за геодезични изследвания, Ереванския държавен университет, са проведени

множество числени експерименти, доказващи коректността на математическите модели и алгоритми, както и на тяхната програмна реализация в среда MATLAB.

5.4.3. Бъдещи насоки на научната работа на автора

Изследванията, анализът и резултатите в настоящият дисертационен труд са основа за разширяване на периметъра и задълбочени на познанията в областта на интерферометричната и диферентно интерферометрична SAR методология и техника. Резултатите могат да намерят приложения в различни научни области:

- Моделиране на комплексни SAR сигнали, отразени от сложни геометрични повърхности.
- Приложение на високоефективни изчислителни техники, методи и алгоритми за обработка на комплексни данни, получени от сателитни SAR системи.
- Изследване на релефа и деформациите на земна повърхност чрез използване на квази SAR интерферометрични методи и алгоритми за тяхното приложение.
- Мониторинг на земната повърхност чрез техника за дистанционни изследвания;
- Създаване на цифрови модели на релефа на земната повърхност с широко и актуално приложение в редица области на науката: геодезията, картографията, геология, строителството и др.

5.5. Декларация за оригиналност на резултатите

Декларирам, че настоящата дисертация съдържа оригинални резултати, получени при проведени от мен научни изследвания {с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител}. Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са надлежно и подробно цитирани в библиографията.

Настоящата дисертация не е прилагана за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис:

5.6. Благодарности

Работата в глава 4 "натурни експерименти с реални сателитни изображения" е резултат вследствие на подкрепата от следните проекти: NATO Science for Peace and Security (SPS) Programme: NATO CLG:983876, Project ESA C1P-6051, Project BG051PO001-3.3.04/40.

ФИГУРИ

Фиг. 1. Scopus, Keyword: InSAR, Results: 3116, Period: 1990-2012	19
Фиг. 2. ScienceDirect, Keyword: InSAR, Results: 1257, Period: 1991-2012	20
Фиг. 3. IEEE Xplore® Digital Library, KeyWord: InSAR, Results: 3050, Period: 1990-2012	20
Фиг. 4. Брой публикации в Scopus, ScienceDirect и IEEE Xplore® Digital Library за периода от 1991 до 2011.	21
Фиг. 5. Геометрия на InSAR.	23
Фиг. 6. Геометричен модел на повърхнината, наблюдавана от SAR.	24
Фиг. 7. Тримерна матрица на данните за разстоянията до доминиращите точкови излъчватели от наблюдаваната повърхност.	25
Фиг. 8. Поелементно умножение на четири мерни матрици.	29
Фиг. 9. Визуализация на получения комплексен сигнал: реална компонента на SAR сигнал (а) и мним компонента на SAR сигнала (б).	30
Фиг. 10. Реконструкция на повърхнината: тримерна изометрична проекция на наблюдаваната повърхнина – амплитудна картина.	31
Фиг. 11. Комплексно изображение на наблюдаваната повърхнина: амплитудна (а) и фазова (б) картина на комплексния образ.	31
Фиг. 12. Блок диаграма на процеса на формиране на комплексните SAR сигнали.	34
Фиг. 13. Геометрия на InSAR.	35
Фиг. 14. Матрица на разстоянието до ij -тия пиксел.	37
Фиг. 15. Време закъснение.	37
Фиг. 16. InSAR геометрия.	39
Фиг. 17. Блок схема за корегистрация на изображения посредством корелация	44
Фиг. 18. (а) Амплитуда и фаза на главното изображение, (б) Амплитуда и фаза на подчиненото изображение.	46
Фиг. 19. (а) Кохерентна карта, (б) Интерферограма.	48
Фиг. 20. (а) Земна повърхност, (б) положителни стойности, (в) деформация.	48
Фиг. 21. Общ вид на GEO TIFF файл.	49
Фиг. 22. Разстояния до първоначалната повърхност.	50
Фиг. 23. Разстояния до повърхността с положителни стойности.	50
Фиг. 24. Разстояния до деформираната повърхност с положителни стойности.	50
Фиг. 25. Квази интерферограма до първоначалната повърхност.	51
Фиг. 26. Квази интерферограма до повърхността с положителни стойности.	51
Фиг. 27. Квази интерферограма до деформираната повърхност с положителни стойности.	51
Фиг. 28. Разстелени фази и тяхната диферентна.	52
Фиг. 29. Свити фази и тяхната диферентната.	53
Фиг. 30. Сгънати и разстелени фази и техните диферентни.	53
Фиг. 31. (а) Земна повърхност, (б) положителни стойности на релефа.	54
Фиг. 32. Визуализация на получените комплексни сигнали: амплитуда и фаза.	56
Фиг. 33. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения преди ефективна подпикселна корегистрационна процедура.	57
Фиг. 34. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения след ефективна подпикселна корегистрационна процедура.	57
Фиг. 35. Амплитуда и фаза извлечени от комплексната диферентна интерферограма.	58
Фиг. 36. (а) Наблюдавана повърхност, (б) деформирана повърхност.	66
Фиг. 37. Блок схема на формиране на SAR сигнал.	69
Фиг. 38. (а) Амплитуда, (б) Фаза на първия комплексен сигнал.	70

Фиг. 39. (а) Амплитуда, (б) Фаза на втория комплексен сигнал.....	70
Фиг. 40. (а) Амплитуда, (б) Фаза на третия комплексен сигнал.....	71
Фиг. 41. Визуализация на получените комплексни изображения: амплитуда и фаза.	72
Фиг. 42. Визуализация на получените възстановени изображения: амплитудна и фазова информация след тяхната корегистрация.	73
Фиг. 43. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения преди стартиране на ефективна подпикселна корегистрационна процедура.....	74
Фиг. 44. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения след стартиране на ефективна подпикселна корегистрационна процедура.	74
Фиг. 45. Амплитуда и фаза, извлечени от комплексната диферентна интерферограма.	75
Фиг. 46. (а) Амплитуда, (б) Фаза на комплексния сигнал за получаване на първото изображение.....	76
Фиг. 47. (а) Амплитуда, (б) Фаза на комплексния сигнал за получаване на второто изображение.....	77
Фиг. 48. (а) Амплитуда, (б) Фаза на първото комплексно изображение.	78
Фиг. 49. (а) Амплитуда, (б) Фаза на второто комплексно изображение.....	78
Фиг. 50. Кохерентна карта (амплитуда) и интерферограма (фаза) получени от комплексните изображения.....	79
Фиг. 51. (а) Интерферометрична фаза на първоначалната повърхност, (б) интерферометрична фаза на деформираната повърхност.	81
Фиг. 52. Диферентни фазови разлики с и без деформация.	81
Фиг. 53. MATLAB® unwrap function.	82
Фиг. 54. 2D Costantini phase unwrapping based on network programming.....	82
Фиг. 55. 2D Goldstein branch cut phase unwrapping algorithm.	82
Фиг. 56. Местоположение на Dilijan, Кавказки регион, Армения.	84
Фиг. 57. Избор на район за изследване.....	84
Фиг. 58. (а) Разстояния от първия сателит до пикселите на повърхността; (б) Разстояния от втория сателит до пикселите на повърхността, представени в псевдо-цветна карта.	85
Фиг. 59. (а) Разстелена фаза; (б) Свита фаза.	86
Фиг. 60. Карта на национално опасните райони в Армения, Кавказ и областта на проучването са маркирани.	87
Фиг. 61. Комплексни сателитни изображения от инструмента ASAR на сателита Envisat, както следва: (а) 30 август 2008, (б) 4 октомври 2008).	88
Фиг. 62. InSAR схема на интерферометричния процес на обработка.	89
Фиг. 63. Главно комплексно изображение (а) Амплитуда, (б) Фаза.	91
Фиг. 64. Подчинено комплексно изображение (а) Амплитуда, (б) Фаза.....	91
Фиг. 65. Интерферометрична фаза след оплоскостяване.....	91
Фиг. 66. Осреднена амплитуда и интерферометрична фаза след оплоскостяване.	91
Фиг. 67. Интерферометрична кохерентна карта.	92
Фиг. 68. Диферентна фаза.....	92
Фиг. 69. Амплитуда (релеф) с диферентна фаза - DInSAR.....	92
Фиг. 70. Карта на свлачищата на територията на Република Армения.	93
Фиг. 71. Графика на перпендикулярни и времеви базови линии.....	96
Фиг. 72. Обединен цифров модел на релефа.....	97
Фиг. 73. 33985-34486 - Комплексна интерферограма.....	98
Фиг. 74. 33985-38494 - Комплексна интерферограма.....	98
Фиг. 75. 33985-40498 - Комплексна интерферограма.....	98
Фиг. 76. 33985-34486 - Оплоскостена интерферограма.	98

Фиг. 77. 33985-38494 - Оплоскостена интерферограма.	98
Фиг. 78. 33985-40498 - Оплоскостена интерферограма	98
Фиг. 79. 33985-34486 – Интерферограма с премахната топография.....	98
Фиг. 80. 33985-38494 – Интерферограма с премахната топография.....	98
Фиг. 81. 33985-40498 – Интерферограма с премахната топография.....	98
Фиг. 82. 33985-34486 – Кохерентна Карта.	98
Фиг. 83. 33985-38494 – Кохерентна Карта.	98
Фиг. 84. 33985-40498 – Кохерентна Карта.	98
Фиг. 85. 33985-34486 – Вектори на грешки и ротация.....	99
Фиг. 86. 33985-38494 – Вектори на грешки и ротация.....	99
Фиг. 87. 33985-40498 – Вектори на грешки и ротация.....	99
Фиг. 88. Свлачищни райони с високо ниво на риск в Армения.	101
Фиг. 89. Изглед на път, след свлачище.	102
Фиг. 90. Растер на топографската карта на Армения в размер 1:100000.	104
Фиг. 91. Цифров модел на релефа на Армения.....	104
Фиг. 92. Свлачище <i>Voghchaberd</i> на топографската карта на Армения.	105
Фиг. 93. Цифров модел на релефа на свлачището <i>Voghchaberd</i>	105
Фиг. 94. Свлачище <i>Dilijan</i> на топографската карта на Армения.	106
Фиг. 95. Цифров модел на релефа на свлачището <i>Dilijan</i>	106
Фиг. 96. Свлачище <i>Ughedzor (Kochbek)</i> на топографската карта на Армения.	106
Фиг. 97. Цифров модел на релефа на свлачището <i>Ughedzor (Kochbek)</i>	106
Фиг. 98. Свлачищна зона на земетресението <i>Spitak</i> на топографската карта на Армения. ..	107
Фиг. 99. Цифров модел на релефа на свлачищната зона на земетресението <i>Spitak</i>	107
Фиг. 100. Граф на генерирането на модифициран цифров модел на релефа.	108
Фиг. 101. Интерферограми с най нехомогенен цветен ефект.....	109
Фиг. 102. Интерферограми с интерферометрични кръгове.....	109
Фиг. 103. Геореферирани интерферограми.	110
Фиг. 104. Топографска карта на свлачището на 6-км от магистрала <i>Voskepar-Baghanis</i> , в размер 1:100000.	111
Фиг. 105. Свлачището на 6-км от магистралата <i>Viskepar-Baghanis</i> , комбинирана с плоската интерферограма.	111
Фиг. 106. Свлачищни явления в Армения според изследването на организацията <i>ЛСА</i>	112
Фиг. 107. Зони с пълно съвпадение на свлачищни явления, според <i>ЛСА</i>	112
Фиг. 108. Зони далеч от свлачищните явления.	113

ТАБЛИЦИ

Табл. 1. Брой публикации в Scopus, ScienceDirect и IEEE Xplore® Digital Library за периода от 1990 до 2012.	21
Табл. 2. Време за изчисляване на разстоянията R	32
Табл. 3. Програмна реализация в среда MATLAB на процеса на формиране на комплексните SAR сигнали.	33
Табл. 4. Параметри на двете сателитни системи	46
Табл. 5. Параметри на сателитните радиолокационни системи	54
Табл. 6. Възстановяване на образа чрез бързо преобразование на Фурие.	55
Табл. 7. Програмен фрагмент за изчисляване на комплексните интерферограми.	57
Табл. 8. Амплитуда и фаза на трите комплексни изображения при различни базови линии.	60
Табл. 9. Амплитуда и фаза на трите интерферометрични комплексни изображения при различни базови линии преди ефективна подпикселна корегистрационна процедура.	61
Табл. 10. Амплитуда и фаза на трите интерферометрични комплексни изображения при различни базови линии след ефективна подпикселна корегистрационна процедура.	62
Табл. 11. Амплитуда и фаза на трите диферентни интерферограми при различни базови линии.	63
Табл. 12. Времена за изпълнение на алгоритъма.	64
Табл. 13. Ефективна подпикселна корегистрационна процедура.	65
Табл. 14. Апаратна и програмна част.	65
Табл. 15. Параметри на сателитните радиолокационни системи.	67
Табл. 16. Формиране на SAR сигнал.	68
Табл. 17. Възстановяване на образа чрез бързо преобразование на Фурие.	71
Табл. 18. Програмен фрагмент за изчисляване на комплексните интерферограми.	73
Табл. 19. Параметри на сателитните радиолокационни системи.	75
Табл. 20. Възстановяване на образа чрез двуменсионно дискретно преобразуване на Фурие.	78
Табл. 21. Програмен фрагмент за изчисляване на кохерентна карта и интерферограма.	79
Табл. 22. Параметри на радио-локационната система при двете облитания.	80
Табл. 23. Списък на използваните продукти.	95
Табл. 24. Оразмерени комплексни изображения.	95
Табл. 25. Оценка на базовите линии на комплексните изображения.	96
Табл. 26. Координати на най-активните свлачища в Армения.	101
Табл. 27. Геокоординати на свлачището на 6-км от магистрала Voskepar-Baghanis.	110
Табл. 28. Гео координатите на записаните свлачищни зони.	113
Табл. 29. Райони, които не съвпадат със свлачищните.	114

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.Лазаров, Д.Минчев, "SAR Imaging Model," *БСУ, Конференция*, 2010.
- [2] R. Bamler, "A Comparison of Range-Doppler and Wavenumber Domain SAR Focusing Algorithms," *IEEE Trans. on GRS*, pp. 706-713, 1992.
- [3] R. K. Raney, "Precision SAR Processing Using Chirp Scaling," *IEEE Trans. on GRS*, pp. 786-799, 1994.
- [4] R. K. Raney, "An exact wide field digital imaging algorithm," *International Journal of Remote Sensing*, pp. 991-998, 1992.
- [5] A. Moreira, "Airborne SAR Processing of Highly Squinted Data Using a Chirp Scaling Algorithm with Motion Compensation," *IEEE Trans. on GRS*, pp. 1029-1040, 1994.
- [6] M. Bryant, L. Bryant, L. Gostin, M. Soumekh, "3-D E-CSAR Imaging of a T-72 Tank and Synthesis of its SAR Reconstructions," *IEEE Trans. on AES*, vol. 39, No. 1 January, 2003.
- [7] H. Jeong, J. H. Park, J. B. Kwon, Y. Oh, "VLSI Architecture for SAR Data, Comprescion," *IEEE Trans. on AES*, vol. 38, no. 2, April 2002.
- [8] Y. L. Neo, Fr. Wong, Ian G Cumming, "A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion.," *Geoscience and Remote Sensing Letters*, pp. 93-97, 2007.
- [9] А.Лазаров, Д.Минчев, "Моделиране на процеса на формиране на InSAR сигнал," *БСУ*, 2008.
- [10] J-M Nicolas, G. Vasile, M. Gay, Fl. Tupin, Em. Trouvé, "SAR processing in the temporal domain: application to direct interferogram generation and mountain glacier monitoring," *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 33, pp. 52-59, 2007.
- [11] F. R. Hanssen Van Leijen, "Interferometric radar meteorology: resolving the acquisition ambiguity.," in *In CEOS SAR Workshop*, Germany, 2004, p. 6.
- [12] C. Colesanti, Al. Ferretti, F. Novali, Cl. Prati, F. Rocca, "SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers Technique.," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 7, pp. 1685-1701, 2003.
- [13] Y., H. Long, Sh. Huang Pi, "A SAR parallel processing algorithm and its implementation," in *Pecora 15/Land Satellite Information IV/ISPRS Commission I/FIEOS 2002 Conference Proceedings*, 2002.
- [14] А.Лазаров, Д.Минчев, "SAR pseudo differencial interferogram modeling," *БСУ, Конференция*, 2011.
- [15] H., Nagler, T., Rocca, F., et al. Rott, "InSAR techniques and applications for monitoring landslides and subsidence," *Geoinformation for European-wide integration, Proceedings of EARSeL Assembly, Prague*, pp. 25-31, 2003.
- [16] D., Feigl, K.L. Massonet, "Radar interferometry and its application to changes in the Earth_s surface," *Rev. Geophys.*, vol. 36, pp. 441-500, 1998.
- [17] E., Mayer, C., Rott, H. Henry, "Mapping mining-induced subsidence from space in a hard rock mine, example of SAR interferometry application at Kiruna mine," *CIM Bull.*, vol. 97, no. 1083, pp. 1-5, 2004.
- [18] L. C Graham, "Synthetic Interferometer Radar for Topographic," in *Proc. of the IEEE*, 62(2), 1974, pp. 763-768.
- [19] P., S. Hensley, I. Joughin, F. Li, S. Madsen, E. Rodriguez, R. Goldstein Rosen, "Synthetic Aperture Radar Interferometry," in *Proc. IEEE*, vol. 88, No. 3, 2000, pp. 333-382.
- [20] Ch.T. Allen, "Interferometric Synthetic Aperture Radar - Review article," in *GRSSN*, 1995, pp. 6-14.
- [21] H.A. Zebker, R.M. Goldstein, "Topographic mapping from interferometric SAR observations," in *J. Geophys. Res.*, vol. 91, 1986, pp. 4993-4999.
- [22] R.M. Goldstein, H.A. Zebker, C.L.Werner, "Satellite radar interferometry: Twodimensional phase unwrapping.," in *Radio Science*, vol. 23, July/Aug., no. 4, 1988, pp. 713-720.

- [23] D. Massonnet et al., "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry," in *Nature*, 8 July 1993, Vol. 364, 1993, pp. 138-142.
- [24] H. Zebker, P. Rosen, R. Goldstein, A. Gabriel, C. Werner, "On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake," *J. Geophys. Res.*, vol. 99, no. B10, pp. 19617-19634, 1994.
- [25] R.M. Goldstein, H. Engelhardt, B. Kamb, R.M. Frolich, "Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream.," in *Application to an Antarctic ice stream. Science*, 3, December 1993, vol. 262, 1993, pp. 1525-1530.
- [26] S. N. Madsen, H. A. Zebker, *Manual of Remote Sensing*, v.2, Chapter 6: Imaging Radar Interferometry. New York: Henderson and Lewis, Eds, Am. Soc. Photogrammetry and Remote Sensing, Wiley., 1998.
- [27] T. Wright, "Remote monitoring of the earthquake cycle using satellite radar Interferometry.," *Phil. Trans. R. Soc., Lond., A*, 360, pp. 2873-2888, 2002.
- [28] R. Bürgmann, P. Rosen, E. Fielding, "Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation.," *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28, pp. 169–209, 2000.
- [29] T.G. Farr et al., "The Shuttle Radar Topography Mission," *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183, 2007.
- [30] ESA. ESA. [Online]. <http://www.esa.int/>
- [31] Infoterra. Infoterra. [Online]. <http://www.infoterra.de/tandem-x-satellite>
- [32] D. Small, A. Barmettler, T. Egli. (2008) Differential SAR-Interferometry. [Online]. <http://www.geo.uzh.ch/en/units/remote-sensing-laboratories/research/radar-remotesensing-sarlab/former-research-projects/differential-sar-interferometry/>
- [33] R. Hanssen, "Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis.," *Remote Sensing and Digital Image Processing, Volume 2. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands*, p. 308, 2001.
- [34] T. Chen, W. Rossow, Y. Zhang, "Radiative effects of cloud-type variations," *J. Climate*, vol. 13, pp. 264-286, 2000.
- [35] A. Ferretti, A. Monti-Guarnieri, C. Prati, F. Rocca, D. Massonnet, *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (TM-19)*.: ESA Publications, 2007.
- [36] E. Rodriguez, J.M. Martin, "Theory and design of interferometric synthetic aperture radars," *Radar and Signal Processing, IEE Proceedings*, vol. 139, no. 2, pp. 147 - 159, Apr. 1992.
- [37] K. Eldhuset, "A new fourth-order processing algorithm for spaceborne SAR," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, vol. 34, no. 3, pp. 824 - 835, June 1998.
- [38] G. Palubinskas, M. Datcu, R. Pac, "Clustering algorithms for large sets of heterogeneous remote sensing data," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International*, 1999, pp. 1591 - 1593.
- [39] A. Roth, A. Eineder, B. Rabus, E. Mikusch, B. Schattler, "SRTM/X-SAR: products and processing facility," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 745 - 747.
- [40] S. Albrecht, I. Cumming, "Application of momentary Fourier transform to SAR processing," *Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings*, vol. 146, no. 6, pp. 285 - 297, Dec. 1999.
- [41] R. Romeiser, O. Hirsch, "Possibilities and limitations of current measurements by airborne and spaceborne along-track interferometric SAR," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 575 - 577.
- [42] A. Moccia, G. Rufino, "Spaceborne along-track SAR interferometry: performance analysis and mission scenarios," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transaction*, vol. 37, no. 1, pp. 199 - 213, Jan. 2001.
- [43] H.A. Zebker, "Studying the Earth with interferometric radar," *Computing in Science & Engineering*, vol. 2, no. 3, pp. 52 - 60, 5-6 2000.

- [44] A.J. Wilkinson, R.T. Lord, M.R. Inggs, "Repeat pass SAR interferometry at VHF band," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 123 - 125.
- [45] J. Allievi, A. Ferretti, C. Prati, R. Ratti, F. Rocca, "Automation of the DEM reconstruction from ERS Tandem pairs," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 2504 - 2506.
- [46] I. Baran, M.P. Stewart, B.M. Kampes, Z. Perski, P. Lilly, "A modification to the Goldstein radar interferogram filter," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, vol. 41, no. 9, pp. 2114 - 2118, Sep. 2003.
- [47] E. Sansosti, "A simple and exact solution for the interferometric and stereo SAR geolocation problem," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 42, no. 8, pp. 1625 - 1634, Aug. 2004.
- [48] Jing-Fa Zhang, Qiming Qin, "The research of difference interferometric SAR technique," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*, 2003, pp. 3827 - 3829.
- [49] S. Knedlik, O. Loffeld, A. Hein, C. Arndt, "A novel approach to accurate baseline estimation," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International*, 1999, pp. 254 - 256.
- [50] H. Kimura, H. Kinoshita, T. Ohishi, M. Kawai, M. Tokuda, "Experimental analysis of differential SAR interferometry," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International*, 1999, pp. 2404 - 2406.
- [51] D. Small, C. Werner, D. Nuesch, "Baseline modelling for ERS-1 SAR interferometry," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1993. IGARSS '93. Better Understanding of Earth Environment., International*, 1993, pp. 1204 - 1206.
- [52] Lei Ying, D.C., Jr. Munson, R. Koetter, B.J. Frey, "Multibaseline InSAR terrain elevation estimation: a dynamic programming approach," in *Image Processing, 2003. ICIP 2003. Proceedings. 2003 International Conference*, 2003, pp. 157-160.
- [53] Zhishun She, R.E. Bogner, "Image registration for multiple pass synthetic aperture radar (SAR)," in *Information, Decision and Control, 1999. IDC 99. Proceedings. 1999, 1999*, pp. 341 - 345.
- [54] Ma Debao, Li Wugao, Le Zhongxin, Wang Jiefeng, "The new matrix characteristic methods of image fine registration for synthetic aperture radar interferometry," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, 2000, pp. 758 - 760.
- [55] C. Werner, T. Strozzi, U. Wegmuller, A. Wiesmann, "SAR geocoding and multi-sensor image registration," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International*, 2002, pp. 902 - 904.
- [56] A. Giancaspro, L. Candela, E. Lopint, V.A. Lore, G. Milillo, "SAR images co-registration parallel implementation," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International*, 2002, pp. 1337 - 1339.
- [57] I.Parcharidis, M. Foumelis, E. Lekkas, M. Segou, "Implication of Secondary Geodynamic Phenomena on Co-seismic Interferometric Coherence," , Frascati, Italy, 2006, p. 43.
- [58] A Hein, "Processing of SAR Data: Fundamentals, Signal processing," in *Interferometry. Ser.: Signals and communication technology, Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Berlin, Germany, 2004, p. 291.
- [59] R.M. Goldstein, C.L. Werner, "Radar interferometry filtering for geophysical applications,," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 25, no. 21, pp. 4035-4038, 1998.
- [60] J.M.N. Leitaó, M.A.T. Figueiredo, "Interferometric image reconstruction as a nonlinear Bayesian estimation problem," in *Image Processing, 1995. Proceedings., International Conference*, 1995, pp. 453 - 456.

- [61] J.M. Francos, B. Friedlander, "The polynomial phase differencing algorithm for 2D phase unwrapping: performance analysis," in *Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996. ICASSP-96. Conference Proceedings*, 1996, pp. 2411 - 2414.
- [62] D. Small, P. Pasquali, S. Fuglistaler, "A comparison of phase to height conversion methods for SAR interferometry," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future.'*, International, 1996, pp. 342 - 344.
- [63] G. Fornaro, G. Franceschetti, R. Lanari, E. Sansosti, "A theoretical analysis on the robust phase unwrapping algorithms for SAR interferometry," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future.'*, International, 1996, pp. 2047 - 2049.
- [64] M. Datcu, "Maximum entropy solution for interferometric SAR phase unwrapping," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future.'*, International, 1996, pp. 2054 - 2056.
- [65] B. Friedlander, J.M. Francos, "Model based phase unwrapping of 2-D signals," *Signal Processing, IEEE Transactions*, vol. 44, no. 12, pp. 2999 - 3007, Dec. 2006.
- [66] G.W. Davidson, R. Bamler, "A multiresolution approach to improve phase unwrapping," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future.'*, International, 1996, pp. 2050 - 2053.
- [67] Zhijun Wang, Shusun Li, "Phase unwrapping through a branch-cut based recursive patching method," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International*, 1998, pp. 1431 - 1433.
- [68] G. Fornaro, E. Sansosti, "A two-dimensional region growing least squares phase unwrapping algorithm for interferometric SAR processing," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, vol. 37, no. 5, pp. 2215 - 2226, Nov. 1999.
- [69] A. Vidal-Pantaleoni, R. Oviol, M. Ferrando, "A comparison of phase unwrapping techniques in synthetic aperture radar interferometry," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International*, 1999, pp. 1354 - 1356.
- [70] G. Poggi, A.R.P. Ragozini, D. Servadei, "A Bayesian approach for SAR interferometric phase restoration," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, 2000, pp. 3202 - 3205.
- [71] A.B. Suksmono, A. Hirose, "Interferometric SAR image restoration using Monte Carlo metropolis method," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 2, pp. 290 - 298, Feb. 2002.
- [72] A.V. Ksendzук, V.K. Volosyuk, "Multi-base INSAR with enhanced signal processing," in *Antenna Theory and Techniques, 2003. 4th International Conference*, 2003, pp. 405 - 408.
- [73] Y. Dukhopelnikova, "Methods of phase unwrapping in SAR interferometry," in *Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves, 2004. MSMW 04. The Fifth International Kharkov Symposium*, 2004, pp. 226 - 228.
- [74] R. Touzi, A. Lopes, J. Bruniquel, P.W. Vachon, "Coherence estimation for SAR imagery," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, vol. 37, no. 1, pp. 135 - 149, Jan. 1999.
- [75] R. Abdelfattah, J.M. Nicolas, F. Tupin, B. Badredine, "InSAR coherence estimation for temporal analysis and phase unwrapping applications," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 2292 - 2294.
- [76] D.R. Stevens, I.G. Cumming, A.L. Gray, "Options for airborne interferometric SAR motion compensation," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, vol. 33, no. 2, pp. 409-420, Mar. 1995.
- [77] L.W., Raggam, H. Kenyi, "Atmospheric induced errors in interferometric DEM generation," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS 96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future.'*, International, 1996, pp. 353 - 355.
- [78] Tang Zhi, Li Jingwen, Zhou Yinqing, "Analysis on noise reduction method for interferometric

- SAR image," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International*, 2004, pp. 4243 - 4246.
- [79] Lu Xiaode, Song Fuming, Song Jiajun, "Analyzing on phase error for single pass interferometric SAR," in *Microwave and Millimeter Wave Technology, 2002. Proceedings. ICMMT 2002. 2002 3rd International Conference*, 2002, pp. 489 - 492.
- [80] CEOS. CEOS. [Online]. <http://www.ceos.org/>
- [81] JAXA. JAXA. [Online]. www.jaxa.jp
- [82] H. Breit, R. Bamler, "An InSAR processor for on-board performance monitoring of the SRTM/X-SAR interferometer," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International*, 1998, pp. 1904 - 1907.
- [83] A. Roth, W. Knopfle, M. Hubig, N. Adam, "Operational interferometric SAR products," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International*, 1998, pp. 324 - 326.
- [84] J.E. Hilland et al., "Future NASA spaceborne SAR missions," *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE*, vol. 13, no. 11, pp. 9 - 16, Nov. 1998.
- [85] V. Kaupp, B. Holt, "The Alaska SAR Facility: overview and key geophysical applications," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International*, 1998, pp. 1424 - 1427.
- [86] A. Ashok, A.J. Wilkinson, "Topographic mapping with multiple antenna SAR interferometry: a Bayesian model-based approach," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 2058 - 2060.
- [87] A. Refice, F. Bovenga, L. Guerriero, J. Wasowski, "DInSAR applications to landslide studies," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 144 - 146.
- [88] Y.-L. Desnos et al., "The ENVISAT advanced synthetic aperture radar system," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, 2000, pp. 1171 - 1173.
- [89] J.-L. Suchail, C. Buck, J. Guijarro, R. Torres, "The Envisat-1 Advanced Synthetic Aperture Radar instrument," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999. IGARSS '99 Proceedings. IEEE 1999 International*, 1999, pp. 1441 - 1443.
- [90] C. Yonezawa, S. Takeuchi, "Land subsidence detection using long interval ERS/SAR data pairs," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, 2000, pp. 1539 - 1541.
- [91] L. Zan, G. Latini, E. Piscina, G. Polloni, P. Baldelli, "Landslides early warning monitoring system," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International*, 2002, pp. 188 - 190.
- [92] O. Mora, R. Lanari, J.J. Mallorqui, P. Berardino, E. Sansosti, "A new algorithm for monitoring localized deformation phenomena based on small baseline differential SAR interferograms," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International*, 2002, pp. 1237 - 1239.
- [93] Yang Zhen, Y. Ruliang, "Feasibility study of using small satellite synthetic aperture radar for global 3D imaging," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International*, 2002, pp. 3162 - 3164.
- [94] F.Jr. Peri, J.B. Hartley, J.L. Duda, "The future of instrument technology for space-based remote sensing for NASA's Earth Science Enterprise," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 432 - 435.
- [95] Y. Lou et al., "Progress report on the NASA/JPL airborne synthetic aperture radar system," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 2046 - 2048.
- [96] B. Houshmand, P. Gamba, "Interpretation of InSAR mapping for geometrical structures," in

- Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, IEEE/ISPRS Joint Workshop 2001, 2001, pp. 309 - 311.*
- [97] P. Hildebrand et al., "The future global Earth observing system: system requirements and architecture," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*, 2003, pp. 610 - 614.
 - [98] C. Colesanti, A. Ferretti, C. Prati, F. Rocca, "Multi-image satellite SAR interferometry: state of the art and future trends," in *Radar Conference, 2003. Proceedings of the International*, 2003, pp. 239 - 244.
 - [99] A., G. Vasile, Iv. Petilot, Em.Trouve, M. Gay, J-M. Nicolas, Ph. Bolon Julea, "Simulation of SAR Images and Radar Coding of Georeferenced Information for Temperate Glacier Monitoring," in *Laboratoire d'Informatique, Systuemes, Traitement de l'Information et de la Connaissance, Universite de Savoie, FRANCE*.
 - [100] K. Ren, G. Wu, X.Q. Shi, V. Prinnet, "Simulation of interferograms for spaceborn SAR system, Dept. of Electronic Engineering," *Nanjing University of Sciences and Technology, Nanjing, National Laboratory of Pattern Recognition, Institute of Automation, CAS*.
 - [101] K. Ren, G. Wu, X.Q. Shi, V. Prinnet, "Simulation of interferograms for spaceborn SAR system,".
 - [102] M.W.A. van der Kooij, B. Armour, J. Ehrismann, H. Schwichow, S. Sato, "A workstation for spaceborne interferometric SAR data," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96. 'Remote Sensing for a Sustainable Future.', International*, 1996, pp. 339 - 341.
 - [103] Wei Xu, I. Cumming, "Simulator for repeat-pass satellite InSAR studies," in *Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS '97. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development., 1997 IEEE International*, 1997, pp. 1704 - 1706.
 - [104] F. Berizzi, G. Corsini, M. Diani, F. Lombardini, G. Pinelli, "Simulation model and performance analysis of a three-antenna InSAR system," in *Radar 97 (Conf. Publ. No. 449)*, 1997, pp. 119 - 123.
 - [105] K. Schmitt, W. Wiesbeck, "An interferometric SAR processor avoiding phase ambiguities," in *Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS '97. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development., 1997 IEEE International*, 1997, pp. 1713 - 1715.
 - [106] M. Eineder, N. Adam, "A flexible system for the generation of interferometric SAR products," in *Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS '97. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development., 1997 IEEE International*, 1997, pp. 1341 - 1343.
 - [107] J.J. Van Zyl et al., "The AIRSAR/TOPSAR integrated multi-frequency polarimetric and interferometric SAR processor," in *Geoscience and Remote Sensing, 1997. IGARSS '97. Remote Sensing - A Scientific Vision for Sustainable Development., 1997 IEEE International*, 1997, pp. 1358 - 1360.
 - [108] U. Wegmuller, C. Werner, T. Strozzi, "SAR interferometric and differential interferometric processing chain," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International*, 1998, pp. 1106 - 1108.
 - [109] G. Franceschetti, A. Iodice, M. Migliaccio, D. Riccio, "Simulation of SAR interferometric raw signal pairs corresponding to real scenes," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International*, 1998, pp. 2653 - 2655.
 - [110] N. Doren, D.E. Wahl, "Implementation of SAR interferometric map generation using parallel processors," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 1998. IGARSS '98. 1998 IEEE International*, 1998, pp. 2640 - 2642.
 - [111] G. Corsini, M. Diani, F. Lombardini, G. Pinelli, "Simulated analysis and optimization of a three-antenna airborne InSAR system for topographic mapping," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, vol. 37, no. 5, pp. 2518 - 2529, Sep. 1999.
 - [112] S. Dupont, F. Perlant, M. Berthod, "SAMI: an InSAR simulator to improve SAR calibration," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1995. IGARSS '95. 'Quantitative Remote Sensing for Science and Applications', International*, 1995, pp. 559 - 561.

- [113] V.P. Onana, E. Trouve, G. Mauris, J.P. Rudant, E. Tonye, "Thin linear features extraction in SAR images by fusion of amplitude and coherence information," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 3012 - 3014.
- [114] F. De Vita, A. Mori, "Raw/SLC signal simulator for spaceborne interferometric SAR systems," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International*, 2000, pp. 785 - 787.
- [115] M. Farhat, F. Lauzon, A. Trudeau, R. Fiset, "InSAR end-to-end simulation environment," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International*, 2002, pp. 1480 - 1482.
- [116] D. Small, E. Meier, D. Nuesch, "Efficient geolocation and image simulation for extended SAR strip maps," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, 2001, pp. 3152 - 3154.
- [117] M. Eineder, "Efficient simulation of SAR interferograms of large areas and of rugged terrain," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 6, pp. 1415 - 1427, June 2003.
- [118] Kun Ren, V. Prinet, Xiangquan Shi, Gang Wu, "Simulation of interferogram image for spaceborne SAR system," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. Proceedings. 2003 IEEE International*, 2003, pp. 3824 - 3826.
- [119] T. Payne, "Coherent synthetic aperture radar (SAR) pair formation," in *Radar Conference, 2003. Proceedings of the International*, 2003, pp. 109 - 114.
- [120] R.F. Hanssen, "Stochastic modeling of time series radar interferometry," in *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International*, 2004, pp. 2607 - 2610.
- [121] G. Aloisio, M. Cafaro, I. Epicoco, G. Quarta, "A problem solving environment for remote sensing data processing," in *Information Technology: Coding and Computing, 2004. Proceedings. ITCC 2004. International Conference*, 2004, pp. 56 - 61.
- [122] A.V. Ksendzuk, "SAR interferometer optimal processing algorithms for the stochastic surface models," in *Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves, 2004. MSMW 04. The Fifth International Kharkov Symposium*, 2004, pp. 253 - 255.
- [123] А.Лазаров, Д.Минчев, "SAR mapping equations and coordinate transformations," *БСУ, Сиела*, 2009.
- [124] А.Лазаров, Д.Минчев, "Програмно осигуряване на изчисление на параметрите на ISAR геометрично-кинематичния сценарий," *БСУ, Научна конференция "Съвременни технологии 2007"*, 2007.
- [125] geotiffwrite. [Online]. <http://www.rotman-baycrest.on.ca/~jimmy/geotiffwrite/>
- [126] Manuel Guizar-Sicairos, Samuel T. Thurman, James R. Fienup, "Efficient subpixel image registration algorithms," *Opt. Lett.* 33, pp. 156-158, 2008.
- [127] efficient-subpixel-image-registration-by-cross-correlation. [Online]. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/18401-efficient-subpixel-image-registration-by-cross-correlation>
- [128] MATLAB®. [Online]. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [129] A.Lazarov, Ch.Minchev., "Cluster Micro-satellite InSAR Model.," in *SSW, Istanbul*, 2008.
- [130] Prati C., An Overview of SAR Interferometry Rocca F., *An Overview of SAR Interferometry*. Milano, Italy: Dipartimento di Elettronica e Informazione (DEI) Politecnico di Milano (POLIMI), Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133.
- [131] A. Ferretti, Andrea Monti-Guarnieri, Cl. Prati, F. Rocca, Didier Massonnet., The Netherlands: ESA Publications, 2007.
- [132] J.R. Fienup, A.M. Kowalczyk, "Phase retrieval for a complex-valued object by using a low-resolution image," *J. Opt. Soc. Am. A* 7, pp. 450-458, 1990.
- [133] Manuel Guizar-Sicairos, Samuel T. Thurman, James R. Fienup, "Efficient subpixel image

- registration algorithms," *Opt. Lett.*, vol. 33, pp. 156-158, 2008.
- [134] Matlab geotiff. [Online]. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27959>
- [135] Matlab euclidean distance. [Online]. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/71>
- [136] Matlab DFT. [Online]. http://www.clear.rice.edu/elec301/Projects01/image_filt/matlab.html
- [137] F. K. Li, R. M. Goldstein, "Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radar," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, pp. 88-97, 1990.
- [138] H. Rott, T. Nagler. (2006) The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards Advances in Space Research. [Online]. <http://www.elsevier.com/locate/asr>
- [139] D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl, and T. Rabaute Massonnet, "The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry," *Nature*, vol. 362, pp. 138-142, 1993.
- [140] R.E. Reilinger, S. Ergintav, R. Burgmann, S. McClusky, "Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August 1999, M=7.4, Izmit, Turkey earthquake," *Science*, vol. 289, pp. 1519-1524, 2000.
- [141] H., Nagler, T., Rocca, F., et al. Rott, "MUSCL – monitoring urban subsidence, cavities and landslides by remote sensing," in *Institute for Meteorology and Geophysics, EC Project EVG1-CT-1999-00008*. Austria: University of Innsbruck, 2002.
- [142] Y.-L., Buc, C., Guijarro, J., et al. Desnos, "ASAR – Envisat_s advanced synthetic aperture radar," *ESA Bull.*, vol. 102, pp. 91-102, 2000.
- [143] A. Reigber, E. Erten, S. Guillaso, O. Hellwich, "I.D.I.O.T.: a free and easy-to-use software tool for dinsar analysis," in *Envisat Symposium 2007, ESA SP-636*, Montreux, Switzerland, 2007.
- [144] R. Bamler, N. Adam, G.W. Davidson, "Noise-induced slope distortion in 2-D phase unwrapping by linear estimators with application to SAR interferometry," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 36, pp. 705-715, 1998.
- [145] R. Gens, "Two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry: developments and new challenges," *Int. J. Remote Sensing*, vol. 24, pp. 703-710, 2003.
- [146] A. Siegel, "Least squares unwrapping with iterative corrections," *Proceedings of IGARSS_99, IEEE Cat. Nr. 99CH36293*, pp. 2398–2400, 1999.
- [147] R.F. Bucek, P. Nesvara, M. Srb, *Armenian landslide project.*: ISBN: 905809393X, 2002.
- [148] S.Hakobyan, K.Jenderedjian, S.Muradyan, M.Voskanov A.Babayan, *Lake Sevan – Experience and Lessons Learned Brief.*, 2006.
- [149] A. Lazarov, D. Minchev, G. Aleksanyan, M. Ilieva, "Landslide phenomena in sevan national park – Armenia," in *ESA Living Planet 2010*, Bergen, Norway, 2010.
- [150] A.Lazarov, D.Minchev, "Synthesis of Interferogram Based on DEM of Dilijan in Caucasus region - Armenia," in *3rd International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, 2011.
- [151] F.Rocca. (2007) Introduction to INSAR. [Online]. <http://earth.esa.int/landtraining07/D1LA2-Rocca.pdf>
- [152] Melkumyan M., *Seismic Risk Assessment and Mitigation Strategy in Armenia*.
- [153] Armenia Ministry of Nature Protection, *National Action Program to Combat Desertification in Armenia.*: Government of Armenia, 2002.
- [154] Japan International Cooperation Agency. [Online]. <http://www.jica.go.jp/english/>
- [155] Boynaghryan V.R., Stepanyan V.E., Khachatryan D.A., et al., "Landslides in Armenia," *ASOGHIK*, p. 308, 2009.
- [156] Sahakyan G.D., Karakhanyan A.S. Zohrabyan L.N., "Landslide map of Armenian SSR at 1:200 000 scale based on decoding of aerelevation images and geomorphologic investigations (explanation notes for the maps)," *Institute of Geological Sciences of Academy of Sciences SSRA*, p. 36, 1981.
- [157] Dorbath K., Arefiev S., Rogozhin E., "Seismic Tomography Constraints on the Deep Structure

- of the Spitak Earthquake Source Zone," *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol. 40, no. 8, pp. 41-55, 2004.
- [158] Bogachkin B., Oleinik A., et al. Albarede F., "On a Prehistoric Strong Earthquake in the Spitak Area," *Dokl. Akad. Nauk Arm. SSR* 313, pp. 297-400, 1980.
- [159] Aptekman Zh., Afimina T. et al. Arefiev S., "Catalog of Aftershocks of the Spitak," *Earthquake, Fiz. Zemli*, vol. 11, pp. 60-73, 1991.
- [160] Proshyan A.S., Khachatryan D.A. Vardanyan V.P., "Feature of the landslide structure of Fioletovo area in the Dilijan region of Armenian SSR," *Scientific notes of YSU, Natural sciences*, vol. 1, no. 172, pp. 133-139, 1990.
- [161] Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. [Online]. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>
- [162] S. Wise, "Effect of differing DEM creation methods on the results from a hydrological model," *Journal of Computers & Geosciences*, vol. 33, no. 10, pp. 1351-1365, 2007.
- [163] Milana D., Heritage G., Largec A., Fuller I., "Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation," *Journal of Geomorphology*, vol. 125, no. 1, pp. 160-171, 2011.
- [164] R.Sorensen, J. Seibert, "Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components," *Journal of Hydrology*, vol. 347, no. 1-12, 15, pp. 79-89, 2007.
- [165] GMTSAR. GMTSAR. [Online]. <http://topex.ucsd.edu/gmtsar/>
- [166] В.М. Василев, "Моделиране на процеса на преотражение от многоточкова цел," *Сборник научни трудове, Научна сесия НВУ "В. Левски", факултет "Артилерия, ПВО и КИС*, pp. 123-127, 2004.
- [167] A.Lazarov, Ch. Minchev, "Correlation-autofocusing-spectral 2-D ISAR image reconstruction from linear frequency modulated signals," in *21st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Irvine, California, 2002.
- [168] Василев М.В., Зотов Д. Н., "Алгоритъм за обработка на честотно-модулирани сигнали, получени при обратния апертурен синтез," *Научна сесия с международно участие - ВВУАПВО "П. Волов"*, pp. 197-200, 1999.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Програмен код за генериране на интерферограма

SLC1.DAT

```
10000 10000 800000 512 512 256 2 1000 0.025 0.025 1e+010 2.5e+007
```

SLC2.DAT

```
12000 10000 800000 512 512 256 2 1000 0.025 0.025 1e+010 2.5e+007
```

SLC1.M

```
tic;
[x1, y1, z1, Np, Nk, m_n, delta, V, Tp, Tk, f, deltaf] = textread('slc1.dat', '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f', 1);
c = 3*10^8;
omega = 2*pi*f;
b = 2*pi*deltaf / Tk;
deltaT_LFM = Tk/Nk;
xx = 1:l:m_n;
yy = 1:l:m_n;
[x,y] = meshgrid ( xx,yy );
z = peaks(m_n);
x = x(:) .* delta;
y = y(:) .* delta;
z = z(:) .* delta .* 5;
tmp_x = x;
% 1
x = z;
z = tmp_x;
y = -y;
xyz = [(x'); (y'); (z')];
alpha = pi/4;
beta = pi/4;
Vx = V*cos(alpha);
Vy = V*cos(beta);
Vz = 0;
p = 1:Np;
Xr = x1 + (Np/2 - p).*Tp.*Vx;
Yr = y1 + (Np/2 - p).*Tp.*Vy;
Zr = z1 + (Np/2 - p).*Tp.*Vz;
Rxyz = [Xr', Yr', Zr'];
R = dist(Rxyz,xyz);
T = 2.*R./c;
T = sort(T);
Size_Tmn = size(T);
S_exp = zeros(Np,Nk);
S_dem = zeros(Np,Nk);
for p = 1:Np
    for k = 1:Nk
        mint = min(T(p,:));
        NextTmn = 1:Size_Tmn(2);
        phase = mint + (k-1).*deltaT_LFM - T(p,NextTmn);
        phase_rect = (( phase / Tk ) >= 0) & (( phase / Tk ) < 1);
        next = exp(-1i.*(omega.*phase + b.*phase.^2));
        next = next .* phase_rect;
        S_exp(p,k) = S_exp(p,k) + sum(next);
    end
    k = 1:Nk;
    S_dem(p,k) = S_exp(p,k) .* exp(1i.*(omega.*(k-1).*deltaT_LFM + b.*((k-1).*deltaT_LFM).^2));
end
slc = S_dem;
save slc1.mat slc;
slc = fft2(slc); %slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc))));
slc = slc(128:512,1:170);
A = abs( slc );
P = angle( slc );
figure, colormap(flipud(gray))
subplot(1,2,1), imagesc(A), title('Амплитуда 1');
subplot(1,2,2), imagesc(P), title('Фаза 1');
hgsave('slc1');
toc;
```

SHOW_SLC1.M

```
function [] = show_slc1( )
fullscreen = get(0,'ScreenSize');
```

```

load 'slc1.mat';
Amplitude = abs(slc);
Phase = angle(slc);
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(gray)
subplot(1,2,1), imagesc(Amplitude), title('Амплитуда');
subplot(1,2,2), imagesc(Phase), title('Фаза');
slc = fft2(slc); %slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc))));
slc = slc(128:512,1:170);
Amplitude = abs(slc);
Phase = angle(slc);
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(gray)
subplot(1,2,1), imagesc(Amplitude), title('Амплитуда');
subplot(1,2,2), imagesc(Phase), title('Фаза');

```

SLC2.M

```

disp('Генериране на комплексно изображение 2');
tic;
[xl, yl, zl, Np, Nk, m_n, delta, V, Tp, Tk, f, deltaf] = textread('slc2.dat', '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f', 1);
c = 3*10^8;
omega = 2*pi*f;
b = 2*pi*deltaf / Tk;
deltaT_LFM = Tk/Nk;
xx = 1:l:m_n;
yy = 1:l:m_n;
[x,y] = meshgrid ( xx,yy );
z = peaks(m_n);
x = x(:) .* delta;
y = y(:) .* delta;
z = z(:) .* delta .* 5;
tmp_x = x;
x = z;
z = tmp_x;
y = -y;
xyz = [(x'); (y'); (z')];
alpha = pi/4;
beta = pi/4;
Vx = V*cos(alpha);
Vy = V*cos(beta);
Vz = 0;
p = 1:Np;
Xr = xl + (Np/2 - p).*Tp.*Vx;
Yr = yl + (Np/2 - p).*Tp.*Vy;
Zr = zl + (Np/2 - p).*Tp.*Vz;
Rxyz = [Xr', Yr', Zr'];
R = dist(Rxyz,xyz);
T = 2.*R./c;
T = sort(T);
Size_Tmn = size(T);
S_exp = zeros(Np,Nk);
S_dem = zeros(Np,Nk);
for p = 1:Np
for k = 1:Nk
mint = min(T(p,:));
NextTmn = 1:Size_Tmn(2);
phase = mint + (k-1).*deltaT_LFM - T(p,NextTmn);
phase_rect = (( phase / Tk ) >= 0) & (( phase / Tk ) < 1);
next = exp(-1i.*(omega.*phase + b.*phase.^2));
next = next .* phase_rect;
S_exp(p,k) = S_exp(p,k) + sum(next);
end
k = 1:Nk;
S_dem(p,k) = S_exp(p,k) .* exp(1i.*(omega.*(k-1).*deltaT_LFM + b.*((k-1).*deltaT_LFM).^2));
end
slc = S_dem;
save slc2.mat slc;
slc = fft2(slc); %slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc))));
slc = slc(128:512,1:170);
A = abs( slc );
P = angle( slc );
figure, colormap(flipud(gray))
subplot(1,2,1), imagesc(A), title('Амплитуда 2');
subplot(1,2,2), imagesc(P), title('Фаза 2');
hgsave('slc2');
toc;

```


SHOW_SLC2.M

```
function [] = show_slc2 ( )
fullscreen = get(0,'ScreenSize');
load 'slc2.mat';
Amplitude = abs(slc);
Phase = angle(slc);
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(gray)
subplot(1,2,1), imagesc(Amplitude), title('Амплитуда');
subplot(1,2,2), imagesc(Phase), title('Фаза');
slc = fft2(slc); %slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc))));
slc = slc(128:512,1:170);
Amplitude = abs(slc);
Phase = angle(slc);
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(gray)
subplot(1,2,1), imagesc(Amplitude), title('Амплитуда');
subplot(1,2,2), imagesc(Phase), title('Фаза');
```

INTERFEROGRAM.M

```
disp('Генериране на интерферограма 12');
tic;
fullscreen = get(0,'ScreenSize');
load slc1.mat;
slc = fft2(slc); % slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc))));
slc = slc(128:512,1:170);
image1 = slc;
load slc2.mat;
slc = fft2(slc); % slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc))));
slc = slc(128:512,1:170);
image2 = slc;
A1 = abs( image1 );
A2 = abs( image2 );
P1 = angle( image1 );
P2 = angle( image2 );
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]) %, colormap(flipud(gray))
subplot(2,2,1), imagesc(A1), title('Амплитуда 1');
subplot(2,2,2), imagesc(A2), title('Амплитуда 2');
subplot(2,2,3), imagesc(P1), title('Фаза 1');
subplot(2,2,4), imagesc(P2), title('Фаза 2');
I1 = image1 .* conj( image2 );
save insar12.mat I1;
I1A = abs(I1);
I1P = angle(I1);
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]) %, colormap(flipud(gray))
subplot(1,2,1), imagesc(I1A), title('Амплитуда 12');
subplot(1,2,2), imagesc(I1P), title('Фаза 12');
hgsave('insar12');
toc;
```

Приложение 2. Програмен код за генериране на диферентна интерферограма

SLC1.TXT

```
350000 350000 8e+005 512 512 256 2 1000 0.025 0.0025 1e+010 1.5e+007
```

SLC2.TXT

```
351500 350000 8e+005 512 512 256 2 1000 0.025 0.0025 1e+010 1.5e+007
```

SLC3.TXT

```
350000 351200 8e+005 512 512 256 2 1000 0.025 0.0025 1e+010 1.5e+007
```

PART1.M

```
disp('Генериране на комплексно изображение 1');
tic;
fid = fopen('slc1.txt');
settings = textscan(fid, '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f');
fclose(fid);
[xl, yl, zl, Np, Nk, m_n, delta, V, Tp, Tk, f, deltaf] = settings{:};
c = 3*10^8;
omega = 2*pi*f;
b = 2*pi*deltaf / Tk;
deltaT_LFM = Tk/Nk;
xx = 1:l:m_n;
yy = 1:l:m_n;
[x,y] = meshgrid ( xx,yy );
z = peaks(m_n);
x = x(:) .* delta;
y = y(:) .* delta;
z = z(:) .* delta .* 5;
tmp_x = x;
% 1
x = z;
z = tmp_x;
y = -y;
xyz = [(x'); (y'); (z')];
alpha = pi/4;
beta = pi/4;
Vx = V*cos(alpha);
Vy = V*cos(beta);
Vz = 0;
p = 1:Np;
Xr = xl + (Np/2 - p).*Tp.*Vx;
Yr = yl + (Np/2 - p).*Tp.*Vy;
Zr = zl + (Np/2 - p).*Tp.*Vz;
Rxyz = [Xr', Yr', Zr'];
R = dist(Rxyz,xyz);
T = 2.*R./c;
T = sort(T);
Size_Tmn = size(T);
S_exp = zeros(Np,Nk);
S_dem = zeros(Np,Nk);
for p = 1:Np
    for k = 1:Nk
        mint = min(T(p,:));
        NextTmn = 1:Size_Tmn(2);
        phase = mint + (k-1).*deltaT_LFM - T(p,NextTmn);
        phase_rect = (( phase / Tk ) >= 0) & (( phase / Tk ) < 1);
        next = exp(-1i.*(omega.*phase + b.*phase.^2));
        next = next .* phase_rect;
        S_exp(p,k) = S_exp(p,k) + sum(next);
    end
    k = 1:Nk;
    S_dem(p,k) = S_exp(p,k) .* exp(1i.*(omega.*(k-1).*deltaT_LFM + b.*((k-1).*deltaT_LFM).^2));
end
slc = S_dem;
save slc1.mat slc;
slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc)))); %slc = fft2(slc);
slc = slc(270:370,80:400);
A = abs( slc );
P = angle( slc );
figure, colormap(flipud(gray))
subplot(1,2,1), imagesc(A), title('Амплитуда 1');
subplot(1,2,2), imagesc(P), title('Фаза 1');
hgsave('slc1');
toc;
disp('Генериране на комплексно изображение 2');
```

```

tic;
fid = fopen('slc2.txt');
settings = textscan(fid, '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f');
fclose(fid);
[xl, yl, zl, Np, Nk, m_n, delta, V, Tp, Tk, f, deltaf] = settings{:};
c = 3*10^8;
omega = 2*pi*f;
b = 2*pi*deltaf / Tk;
deltaT_LFM = Tk/Nk;
xx = 1:l:m_n;
yy = 1:l:m_n;
[x,y] = meshgrid ( xx,yy );
z = peaks(m_n);
x = x(:) .* delta;
y = y(:) .* delta;
z = z(:) .* delta .* 5;
tmp_x = x;
% 1
x = z;
z = tmp_x;
y = -y;
xyz = [(x'); (y'); (z')];
alpha = pi/4;
beta = pi/4;
Vx = V*cos(alpha);
Vy = V*cos(beta);
Vz = 0;
p = 1:Np;
Xr = xl + (Np/2 - p).*Tp.*Vx;
Yr = yl + (Np/2 - p).*Tp.*Vy;
Zr = zl + (Np/2 - p).*Tp.*Vz;
Rxyz = [Xr', Yr', Zr'];
R = dist(Rxyz,xyz);
T = 2.*R./c;
T = sort(T);
Size_Tmn = size(T);
S_exp = zeros(Np,Nk);
S_dem = zeros(Np,Nk);
for p = 1:Np
for k = 1:Nk
mint = min(T(p,:));
NextTmn = 1:Size_Tmn(2);
phase = mint + (k-1).*deltaT_LFM - T(p,NextTmn);
phase_rect = (( phase / Tk ) >= 0) & (( phase / Tk ) < 1);
next = exp(-1i.*(omega.*phase + b.*phase.^2));
next = next .* phase_rect;
S_exp(p,k) = S_exp(p,k) + sum(next);
end
k = 1:Nk;
S_dem(p,k) = S_exp(p,k) .* exp(1i.*(omega.*(k-1).*deltaT_LFM + b.*((k-1).*deltaT_LFM).^2));
end
slc = S_dem;
save slc2.mat slc;
slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc)))); %slc = fft2(slc);
slc = slc(270:370,80:400);
A = abs( slc );
P = angle( slc );
figure, colormap(flipud(gray))
subplot(1,2,1), imagesc(A), title('Амплитуда 2');
subplot(1,2,2), imagesc(P), title('Фаза 2');
hgsave('slc2');
toc;
disp('Генериране на комплексно изображение 3');
tic;
fid = fopen('slc3.txt');
settings = textscan(fid, '%f %f %f %f %f %f %f %f %f %f %f');
fclose(fid);
[xl, yl, zl, Np, Nk, m_n, delta, V, Tp, Tk, f, deltaf] = settings{:};
c = 3*10^8;
lamda = c/f;
omega = 2*pi*f;
b = 2*pi*deltaf / Tk;
deltaT_LFM = Tk/Nk;
xx = 1:l:m_n;
yy = 1:l:m_n;
[x,y] = meshgrid ( xx,yy );
z = peaks(m_n);

```

```

elevation = z > 0;
elevation = z .* elevation;
z = z - elevation * 2/3;
x = x(:) .* delta;
y = y(:) .* delta;
z = z(:) .* delta .* 5;
tmp_x = x;
% 1
x = z;
z = tmp_x;
y = -y;
xyz = [(x'); (y'); (z')];
alpha = pi/4;
beta = pi/4;
gama = abs(acos(sqrt(1-(cos(alpha))^2-(cos(beta))^2)));
Vx = V*cos(alpha);
Vy = V*cos(beta);
Vz = 0; % V*cos(gama);
p = 1:Np;
Xr = x1 + (Np/2 - p).*Tp.*Vx;
Yr = y1 + (Np/2 - p).*Tp.*Vy;
Zr = z1 + (Np/2 - p).*Tp.*Vz;
Rxyz = [Xr', Yr', Zr'];
R = dist(Rxyz,xyz);
T = 2.*R./c;
T = sort(T);
Size_Tmn = size(T);
S_exp = zeros(Np,Nk);
S_dem = zeros(Np,Nk);
for p = 1:Np
for k = 1:Nk
mint = min(T(p,:));
NextTmn = 1:Size_Tmn(2);
phase = mint + (k-1).*deltaT_LFM - T(p,NextTmn);
phase_rect = (( phase / Tk ) >= 0) & (( phase / Tk ) < 1);
next = exp(-1i.*(omega.*phase + b.*phase.^2));
next = next .* phase_rect;
S_exp(p,k) = S_exp(p,k) + sum(next);
end
k = 1:Nk;
S_dem(p,k) = S_exp(p,k) .* exp(1i.*(omega.*(k-1).*deltaT_LFM + b.*((k-1).*deltaT_LFM).^2));
end
slc = S_dem;
save slc3.mat slc;
slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc)))); %slc = fft2(slc);
slc = slc(270:370,80:400);
A = abs( slc );
P = angle( slc );
figure, colormap(flipud(gray))
subplot(1,2,1), imagesc(A), title('Амплитуда 3');
subplot(1,2,2), imagesc(P), title('Фаза 3');
hgsave('slc3');
toc;

```

PART2.M

```

disp('Генериране на интергерограмите');
tic;
fullscreen = get(0,'ScreenSize');
load slc1.mat;
slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc)))); %slc = fft2(slc);
slc = slc(270:370,80:400);
image1 = slc;
load slc2.mat;
slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc)))); %slc = fft2(slc);
slc = slc(270:370,80:400);
image2 = slc;
load slc3.mat;
slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc)))); %slc = fft2(slc);
slc = slc(270:370,80:400);
image3 = slc;
A1 = abs( image1 );
A2 = abs( image2 );
A3 = abs( image3 );
P1 = angle( image1 );
P2 = angle( image2 );
P3 = angle( image3 );

```

```

figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(flipud(gray))
subplot(2,3,1), imagesc(A1), title('Амплитуда 1');
subplot(2,3,2), imagesc(A2), title('Амплитуда 2');
subplot(2,3,3), imagesc(A3), title('Амплитуда 3');
subplot(2,3,4), imagesc(P1), title('Фаза 1');
subplot(2,3,5), imagesc(P2), title('Фаза 2');
subplot(2,3,6), imagesc(P3), title('Фаза 3');
I1 = image1 .* conj( image2 ); %I1 = (A1.*exp(1i.*P1)) .* conj(A2.*exp(1i.*P2));
I2 = image1 .* conj( image3 ); %I2 = (A1.*exp(1i.*P1)) .* conj(A3.*exp(1i.*P3));
I1A = abs(I1);
I1P = angle(I1);
I2A = abs(I2);
I2P = angle(I2);
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(flipud(gray))
subplot(2,2,1), imagesc(I1A), title('Амплитуда 12');
subplot(2,2,3), imagesc(I1P), title('Фаза 12');
subplot(2,2,2), imagesc(I2A), title('Амплитуда 13');
subplot(2,2,4), imagesc(I2P), title('Фаза 13');
D1 = I1 .* conj( I2 );
DA = abs(D1);
DP = angle(D1);
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(flipud(gray))
subplot(1,2,1), imagesc(DA), title('Амплитуда 23');
subplot(1,2,2), imagesc(DP), title('Фаза 23');
Icc1 = normxcorr2(abs(image1),abs(image2));
Icc2 = normxcorr2(angle(image1),angle(image2));
Icc3 = normxcorr2(abs(image1),abs(image3));
Icc4 = normxcorr2(angle(image1),angle(image3));
Icc5 = Icc1 - Icc3;
Icc6 = Icc2 - Icc4;
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)])
subplot(2,3,1), imagesc(Icc1), title('Cross-Correlation 12');
subplot(2,3,2), imagesc(Icc3), title('Cross-Correlation 13');
subplot(2,3,3), imagesc(Icc5), title('Cross-Correlation diff');
subplot(2,3,4), imagesc(Icc2);
subplot(2,3,5), imagesc(Icc4);
subplot(2,3,6), imagesc(Icc6);
toc;

```

PART3.M

```

tic;
fullscreen = get(0,'ScreenSize');
load slc1.mat;
slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc)))); % slc = fft2(slc);
slc = slc(270:370,80:400);
image1 = slc;
load slc2.mat;
slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc)))); % slc = fft2(slc);
slc = slc(270:370,80:400);
image2 = slc;
load slc3.mat;
slc = fftshift(fft(transpose(fft(slc)))); % slc = fft2(slc);
slc = slc(270:370,80:400);
image3 = slc;
[output image2] = slc_registration(image1,image2,10); % Coregistration
error = output(1);
diffphase = output(2);
row_shift = output(3);
col_shift = output(4);
fprintf('Translation invariant normalized RMS error between images: %g\n',error);
fprintf('Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-
negative): %g\n',diffphase);
fprintf('Pixel rows shifts between images: %g\n',row_shift);
fprintf('Pixel cols shifts between images: %g\n',col_shift);
[output image3] = slc_registration(image1,image3,10); % Coregistration
error = output(1);
diffphase = output(2);
row_shift = output(3);
col_shift = output(4);
fprintf('Translation invariant normalized RMS error between images: %g\n',error);
fprintf('Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-
negative): %g\n',diffphase);
fprintf('Pixel rows shifts between images: %g\n',row_shift);
fprintf('Pixel cols shifts between images: %g\n',col_shift);
A1 = abs( image1 );
A2 = abs( image2 );

```



```

A3 = abs( image3 );
P1 = angle( image1 );
P2 = angle( image2 );
P3 = angle( image3 );
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(flipud(gray))
subplot(2,3,1), imagesc(A1), title('Амплитуда 1');
subplot(2,3,2), imagesc(A2), title('Амплитуда 2');
subplot(2,3,3), imagesc(A3), title('Амплитуда 3');
subplot(2,3,4), imagesc(P1), title('Фаза 1');
subplot(2,3,5), imagesc(P2), title('Фаза 2');
subplot(2,3,6), imagesc(P3), title('Фаза 3');
I1 = image1 .* conj( image2 ); %I1 = (A1.*exp(1i.*P1)) .* conj(A2.*exp(1i.*P2));
I2 = image1 .* conj( image3 ); %I2 = (A1.*exp(1i.*P1)) .* conj(A3.*exp(1i.*P3));
[output I2] = slc_registration(I1,I2,10); % Coregistration
error = output(1);
diffphase = output(2);
row_shift = output(3);
col_shift = output(4);
fprintf('Translation invariant normalized RMS error between images: %g\n',error);
fprintf('Global phase difference between the two images (should be zero if images are non-
negative): %g\n',diffphase);
fprintf('Pixel rows shifts between images: %g\n',row_shift);
fprintf('Pixel cols shifts between images: %g\n',col_shift);
I1A = abs(I1);
I1P = angle(I1);
I2A = abs(I2);
I2P = angle(I2);
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(flipud(gray))
subplot(2,2,1), imagesc(I1A), title('Амплитуда 12');
subplot(2,2,3), imagesc(I1P), title('Фаза 12');
subplot(2,2,2), imagesc(I2A), title('Амплитуда 13');
subplot(2,2,4), imagesc(I2P), title('Фаза 13');
D1 = I1 .* conj( I2 );
DA = abs(D1);
DP = angle(D1);
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)]), colormap(flipud(gray))
subplot(1,2,1), imagesc(DA), title('Амплитуда 23');
subplot(1,2,2), imagesc(DP), title('Фаза 23');
Icc1 = normxcorr2(abs(image1),abs(image2));
Icc2 = normxcorr2(angle(image1),angle(image2));
Icc3 = normxcorr2(abs(image1),abs(image3));
Icc4 = normxcorr2(angle(image1),angle(image3));
Icc5 = Icc1 - Icc3;
Icc6 = Icc2 - Icc4;
figure('Position',[0 0 fullscreen(3) fullscreen(4)])
subplot(2,3,1), imagesc(Icc1), title('Cross-Correlation 12');
subplot(2,3,2), imagesc(Icc3), title('Cross-Correlation 13');
subplot(2,3,3), imagesc(Icc5), title('Cross-Correlation diff');
subplot(2,3,4), imagesc(Icc2);
subplot(2,3,5), imagesc(Icc4);
subplot(2,3,6), imagesc(Icc6);
toc;

```

SLC_REGISTRATION.M

```

function [output SLC] = slc_registration(slc1,slc2,usfac)
buf1ft = slc1;
buf2ft = slc2;
if exist('usfac')~=1, usfac=1; end
if usfac == 0,
CCmax = sum(sum(buf1ft.*conj(buf2ft)));
rfzero = sum(abs(buf1ft(:)).^2);
rgzero = sum(abs(buf2ft(:)).^2);
error = 1.0 - CCmax.*conj(CCmax)/(rgzero*rfzero);
error = sqrt(abs(error));
diffphase=atan2(imag(CCmax),real(CCmax));
output=[error,diffphase];
elseif usfac == 1,
[m,n]=size(buf1ft);
CC = ifft2(buf1ft.*conj(buf2ft));
[max1,loc1] = max(CC);
[max2,loc2] = max(max1);
rloc=loc1(loc2);
cloc=loc2;
CCmax=CC(rloc,cloc);
rfzero = sum(abs(buf1ft(:)).^2)/(m*n);
rgzero = sum(abs(buf2ft(:)).^2)/(m*n);

```

```

error = 1.0 - CCmax.*conj(CCmax)/(rgzero(1,1)*rfzero(1,1));
error = sqrt(abs(error));
diffphase=atan2(imag(CCmax),real(CCmax));
md2 = fix(m/2);
nd2 = fix(n/2);
if rloc > md2
row_shift = rloc - m - 1;
else
row_shift = rloc - 1;
end
if cloc > nd2
col_shift = cloc - n - 1;
else
col_shift = cloc - 1;
end
output=[error,diffphase,row_shift,col_shift];
else
[m,n]=size(buf1ft);
mlarge=m*2;
nlarge=n*2;
CC=zeros(mlarge,nlarge);
CC(m+1-fix(m/2):m+1+fix((m-1)/2),n+1-fix(n/2):n+1+fix((n-1)/2)) =
fftshift(buf1ft).*conj(fftshift(buf2ft));
CC = ifft2(ifftshift(CC));
[max1,loc1] = max(CC);
[max2,loc2] = max(max1);
rloc=loc1(loc2);cloc=loc2;
CCmax=CC(rloc,cloc);
[m,n] = size(CC); md2 = fix(m/2); nd2 = fix(n/2);
if rloc > md2
row_shift = rloc - m - 1;
else
row_shift = rloc - 1;
end
if cloc > nd2
col_shift = cloc - n - 1;
else
col_shift = cloc - 1;
end
row_shift=row_shift/2;
col_shift=col_shift/2;
if usfac > 2,
row_shift = round(row_shift*usfac)/usfac;
col_shift = round(col_shift*usfac)/usfac;
dftshift = fix(ceil(usfac*1.5)/2);
CC = conj(dftups(buf2ft.*conj(buf1ft),ceil(usfac*1.5),ceil(usfac*1.5),usfac,dftshift-
row_shift*usfac,dftshift-col_shift*usfac))/(md2*nd2*usfac^2);
[max1,loc1] = max(CC);
[max2,loc2] = max(max1);
rloc = loc1(loc2); cloc = loc2;
CCmax = CC(rloc,cloc);
rg00 = dftups(buf1ft.*conj(buf1ft),1,1,usfac)/(md2*nd2*usfac^2);
rf00 = dftups(buf2ft.*conj(buf2ft),1,1,usfac)/(md2*nd2*usfac^2);
rloc = rloc - dftshift - 1;
cloc = cloc - dftshift - 1;
row_shift = row_shift + rloc/usfac;
col_shift = col_shift + cloc/usfac;
else
rg00 = sum(sum( buf1ft.*conj(buf1ft) ))/m/n;
rf00 = sum(sum( buf2ft.*conj(buf2ft) ))/m/n;
end
error = 1.0 - CCmax.*conj(CCmax)/(rg00*rf00);
error = sqrt(abs(error));
diffphase=atan2(imag(CCmax),real(CCmax));
if md2 == 1,
row_shift = 0;
end
if nd2 == 1,
col_shift = 0;
end
output=[error,diffphase,row_shift,col_shift];
end
if (nargout > 1)&&(usfac > 0),
[nr,nc]=size(buf2ft);
Nr = ifftshift([-fix(nr/2):ceil(nr/2)-1]);
Nc = ifftshift([-fix(nc/2):ceil(nc/2)-1]);
[Nc,Nr] = meshgrid(Nc,Nr);

```

```

SLC = buf2ft.*exp(i*2*pi*(-row_shift*Nr/nr-col_shift*Nc/nc));
SLC = SLC.*exp(i*diffphase);
elseif (nargout > 1)&&(usfac == 0)
SLC = buf2ft*exp(i*diffphase);
end
return

function out=dftups(in,nor,noc,usfac,roff,coff)
[nr,nc]=size(in);
if exist('roff')~=1, roff=0; end
if exist('coff')~=1, coff=0; end
if exist('usfac')~=1, usfac=1; end
if exist('noc')~=1, noc=nc; end
if exist('nor')~=1, nor=nr; end
kernc=exp((-i*2*pi/(nc*usfac))*( ifftshift([0:nc-1]).' - floor(nc/2) )*( [0:noc-1] - coff ));
kernr=exp((-i*2*pi/(nr*usfac))*( [0:nor-1].' - roff )*( ifftshift([0:nr-1]) - floor(nr/2) ));
out=kernr*in*kernc;
return

```