



**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**

АВТОРЕФЕРАТ

за придобиване на образователната и научна степен „доктор“

по специалност „информатика“

в професионално направление 4.6

Научни ръководители:

проф. д-р Андон Лазаров, БСУ

доц. д-р Иван Гарванов, УНИ-БИТ

София, 2012 г.

Дисертацията е обсъждана и допусната до защита на разширено заседание на секция „Математически методи за обработка на сензорна информация“ в ИИКТ на БАН, състояло се на 18.05.2012 г.

Дисертацията съдържа 141 стр., 54 формули, 108 фигури, 29 таблици, 9 стр. литература, включваща 168 заглавия и приложения от 10 стр. програмен код.

Защитата на дисертацията ще се състои на г. от часа в зала на на открито заседание на научно жури в състав:

1. акад. Иван Попчев
2. проф. дтн Благовест Шишков
3. проф. дтн Андон Лазаров
4. доц. д-р Вера Бехар
5. доц. д-р Чавдар Минчев

Материалите за защитата са на разположение на интересувашите се в ИИКТ на БАН, София, ул. “Акад. Г.Бончев”, бл. 2

Автор: Димитър Петров Минчев

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

УВОД

Структура на дисертационният труд

Дисертационният труд включва: съдържание, увод, четири глави, заключение с 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 и приложение с програмен код.

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".

Дисертационният труд е оформен в четири глави. Основният текст е изложен на 141 страници. Включени са: 54 формули, 108 фигури и 29 таблици. Фигурите и таблиците са последователно поредно номерирани. Цитирани са 168 литературни източници.

Актуалност на темата и обзор на основните резултати 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.

Апробация 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.

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.

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

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.

1.1.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 задасчите 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;

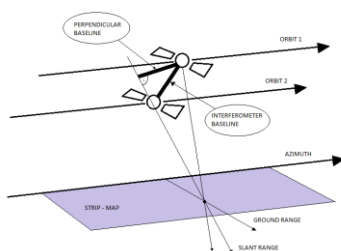
- Да се разработи математически модел, алгоритъм и програмна реализация на процеса за получаване на комплексна интерферограма и диферентна интерферограма;
- Да се извърши числено експериментиране на моделите и алгоритмите при обработка на натурни SAR изображения получени от данните на сателита ENVISAT.

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

В тази глава е разработен 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. 1.



Фиг. 1. 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, израз (1):

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

където $\mathbf{R}_0 = \mathbf{R}(0)$ е векторът разстояние от началото на координатната система до сателита в момент $t = 0$; $\mathbf{V}$ – 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:

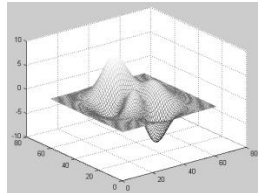
$$(2) \quad \begin{aligned} x(p) &= x_0 - V_x T_p \left(\frac{N}{2} - p \right) \\ y(p) &= y_0 - V_y T_p \left(\frac{N}{2} - p \right), \\ z(p) &= z_0 - V_z T_p \left(\frac{N}{2} - p \right) \end{aligned}$$

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 $p = 0$; $V_x = V \cos \alpha$, $V_y = V \cos \beta$, $V_z = V \cos \delta$ - проекциите на вектора скорост върху координатните системи; $\cos \alpha$, $\cos \beta$, $\cos \gamma$ - направляващи косинуси на вектора скорост.

Наблюдаваната повърхност (Фиг.2), изобразена в координатната система $Oxyz$ 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):

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

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 Ox и Oy .



Фиг. 2. Геометричен модел на повърхнина, наблюдавана от SAR.

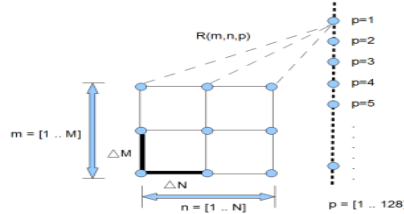
Допуска се, че във всеки разделителен елемент с размер (ΔM , ΔN) и координати (x_{mn} , y_{mn}) е разположен един доминиращ точков излъчвател. В процеса на наблюдение вектор разстоянието $\mathbf{R}_{mn}(p)$ от SAR, разположен от сателита до всеки доминиращ точков излъчвател с геометричен вектор $\mathbf{R}_{mn}$, 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 с израза (5):

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

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.3).



Фиг. 3. Примерна 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 предава поредици от електромагнитни вълни към целта, които са описани аналитично от поредицата на N линейно честотно модулирани импулси (LFM) както следва, израз (6):

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

където A е амплитудата на предадения импулс, T_p е периода на импулса, $\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda}$ е ъгловата честота, $p = \overline{1, N}$ е текущия брой излъчени линейно честотно модулирани импулси, N е общият брой излъчени импулси по време на апертурния синтез, $c = 3.10^8$ 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):

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

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 mn -ия доминиращ точков излъчвател, е дадено в израз (9):

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

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 (10):

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

Времевата продължителност t на отразения SAR сигнал по разстояние за всеки предаден 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 сигналят 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:

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

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:

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

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 $\Delta M = 10\text{ m}$. Размерът на разделителния елемент по оста Oy е $\Delta N = 10\text{ m}$. Повърхнината, описана с уравнение (3), е представена на Фиг.2.

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: $V_x = 0$, $V_y = 300\text{ m/s}$, $V_z = 0$, начални координати на носителя $x_0 = -10^3\text{ m}$, $y_0 = 0\text{ m}$, $z_0 = 3 \cdot 10^5\text{ m}$. 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: $T_p = 10^{-2}\text{ s}$, продължителността на линейно честотно модулирания импулс $T_k = 10^{-6}\text{ s}$, 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 $f = 10^{10}$ Н, честотната лента на импулса е $\Delta F = 1.5 \cdot 10^8$ Hz.

Изчислява се разстоянието от SAR източник до всеки доминиращ точков излъчвател от наблюдаваната повърхност за всеки дискретен момент p по израза (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 $p \in \{1, 2, \dots, 128\}$.

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

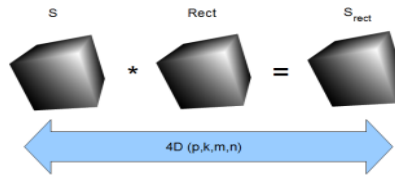
Резултатите от изчислението се записват в четири мерна матрица (масив) $S_{mn}(k, p)$.

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:

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

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

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. 4. 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).

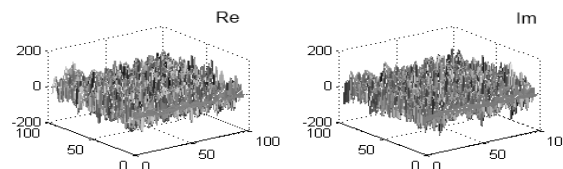
Тогава при сумиране на отразените сигнали по димензиите m и n ще се получат стойностите на интерферентния сигнал $S(k, p)$, записани като елементи на двумерна матрица с адреси $[p, k]$, т.е.

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

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.

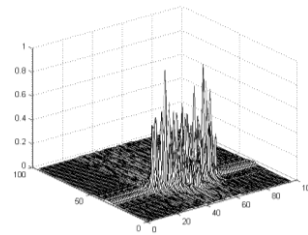
В следващата точка 2.6. е дадена програмната реализация на алгоритъма за възстановяване на комплексното изображение на повърхността от комплексните SAR сигнали. На Фиг.5 е представена визуализация на получения комплексен SAR сигнал с неговите: реална компонента (а) и мнима компонента (б).



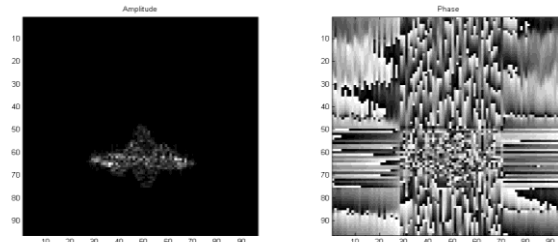
Фиг. 5. Визуализация на получения комплексен сигнал: реална компонента на SAR сигнал (а) и мнима компонента на SAR сигнала (б).

На Фиг.6 е представена реконструкцията на наблюдаваната повърхнина чрез тримерна изометрична проекция. На Фиг.7 е представен комплексния 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. 6. Реконструкция на повърхнината: тримерна изометрична проекция на наблюдаваната повърхнина – амплитудна картина.



Фиг. 7. 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

Програмна реализация в среда MATLAB на процеса на формиране на комплексните SAR сигнали е дадена в Табл.1. Блок диаграма на процеса на формиране на SAR сигнал е представена на Фиг.8.

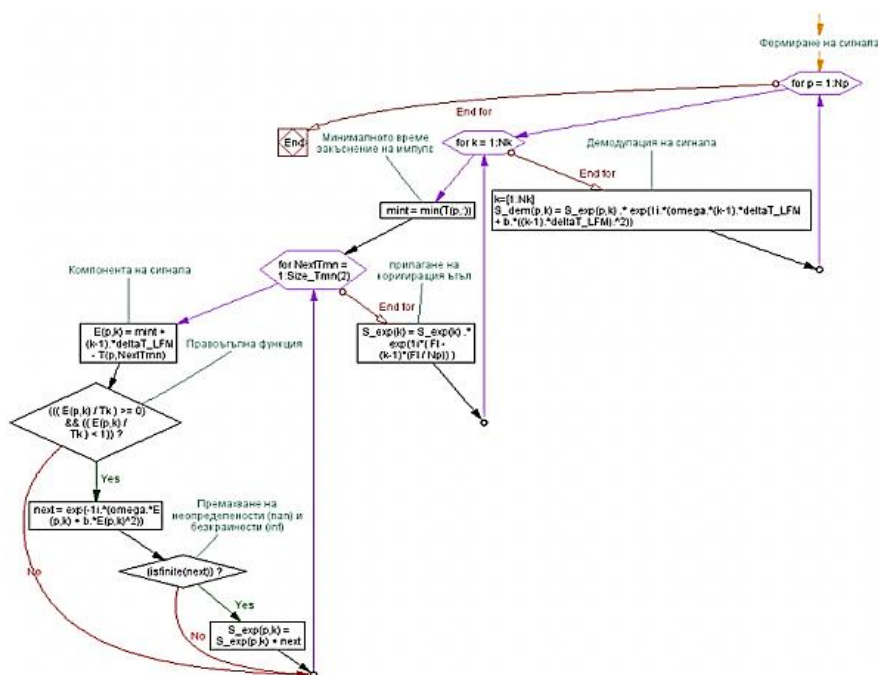
```
%% Коригиращ ъгъл
FI = (-pi/2) - atan(z1/x1);
%% Формиране на сигнала
for p = 1:Np
for k = 1:Nk
% Минималното време закъснение на импулс
mint = min(T(p,:));
for NextTmn = 1:Size_Tmn(2)
% Компонента на сигнала
E(p,k) = mint + (k-1).*deltaT_LFM - T(p,NextTmn);
% Правоъгълна функция
if ((( E(p,k) / 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
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. 1. Програмна реализация в среда MATLAB на процеса на формиране на комплексните SAR сигнали.



Фиг. 8. Блок диаграма на процеса на формиране на комплексните SAR сигнали.

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: разстояния 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 тази глава е разработен математически модел на процеса за получаване на комплексна интерферограма. Генерирани са диферентни интерферограми демонстриращи изменението в релефа след настъпила деформация. Представените изображения са получени чрез цифрово моделиране в програмната среда MATLAB [1].

3.1. Моделиране на процеса на формиране на InSAR сигнал

Зададена е триизмерна повърхност, която е образувана от пиксели, наблюдавана от множество сателити [2] посредством SAR. Ако две позиции на сателита ENVISAT с инструмента ASAR се дефинират като S_1 и S_2 [3], тогава за позицията S_1 е в сила следната геометрична релация [4]: $S_1P_0 = R_0$ - линия на визиране, R_0 - разстоянието от сателита S_1 до референтната точка P_0 , лежаща на нулево ниво, $S_1P_1 = \sqrt{(R_0 + R_p)^2 + N_p^2}$ - е разстоянието до точката на интерес, $R_p = P_0P$ - 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 $q = P_1P_2$ от нулевото ниво. За позиция S_2 : $S_2P_1 = \sqrt{(R_0 + R_p - B_r)^2 + (N_p - B_n)^2}$.

След няколко математически манипулации, вариациите на разстоянието $\Delta R = (S_2P_1 - S_1P_1)$ могат да бъдат изразени като:

$$(20) \quad \Delta R = \frac{B_n N_p}{R_0} = \frac{B_n}{R_0} \left(\frac{R_p}{\tan \theta} + \frac{q}{\sin \theta} \right)$$

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..

$$(21) \quad \Phi = k(2\Delta R),$$

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

Следователно на база израз (20) фазовите разлики, наречени интерферометрична фаза могат да бъдат записани като:

$$(22) \quad \Phi = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n}{R_0} \left(\frac{R_p}{\tan \theta} + \frac{q}{\sin \theta} \right)$$

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 от израз:

$$(23) \quad \frac{d\Phi}{dq} = \frac{4\pi \cdot B_n}{\lambda R_0 \sin \theta}$$

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 :

$$(24) \quad H_a = \frac{\lambda R_0 \sin \theta}{2B_n}$$

На базата на израз (24) 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:

$$(25) \quad \Phi_3 = -\frac{4\pi}{\lambda} d .$$

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

$$(26) \quad \hat{\Phi} = \Phi_2 + \Phi_3 = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_n}{R_0} \left(\frac{q}{\sin \theta} \right) - \frac{4\pi}{\lambda} d .$$

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 корегистрират 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:

$$(27) \quad r^S = a(r^M)^2 + br^M + c(as)^M + d$$

$$(28) \quad (as)^S = e(r^M)^2 + fr^M + g(as)^M + h,$$

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 [5] и [6]. 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:

$$(29) \quad A(y,x) \odot B(y,x) = K(\delta y, \delta x) = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M A(j,k) B(\delta y + j, \delta x + k) = \text{IFFT}[\text{FFT}[A] \text{FFT}[B]^*]$$

Където: функциите $\text{FFT}[\dots]$ и $\text{IFFT}[\dots]$ са съответно права и обратна дискретна трансформация на Фурие (*Discrete Fourier Transform*). Оператора (*) указва комплексно спрегнато (спрягане). 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.

Спектър на изместено изображение се дава с израза:

$$(30) \quad A(y,x) = \sum_{w=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(w,v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{yw}{M} + \frac{xv}{N} \right) \right], 0 \leq w \leq M, 0 \leq v \leq N$$

$$(31) \quad A(y + \delta y, x + \delta x) = \sum_{w=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(w,v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{(y+\delta y)w}{M} + \frac{(x+\delta x)v}{N} \right) \right] = \sum_{w=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(w,v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{yw}{M} + \frac{\delta y w}{M} + \frac{xv}{N} + \frac{\delta x v}{N} \right) \right] = \sum_{w=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} a(w,v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{\delta y w}{M} + \frac{\delta x v}{N} \right) \right] \exp \left[2\pi i \left(\frac{yw}{M} + \frac{xv}{N} \right) \right] = \text{IFFT}[c(w,v)]$$

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

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 $a(w,v)$.

Фазови разлики на изображенията $A(y,x)$ and $B(y,x)$ с изместване от $(\delta y, \delta x)$ пиксела, се дават от израза:

$$(32) \quad B(y,x) = A(y + \delta y, x + \delta x)$$

и в честотната област с изрази:

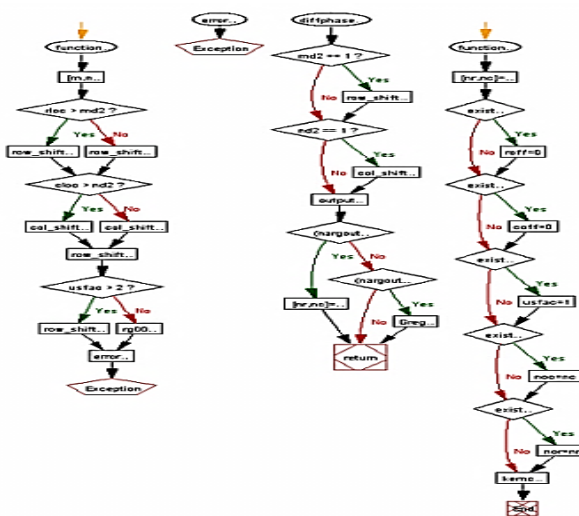
$$(33) \quad b(w, v) = a(w, v) \exp \left[2\pi i \left(\frac{\delta y w}{M} + \frac{\delta x v}{N} \right) \right]$$

разликата в фазите между елементите $a(w, v)$ и $b(w, v)$ е свързана само с изместването на изображението, израз:

$$(34) \quad d(w, v) = b(w, v) a(w, v)^* = |b(w, v)| |a(w, v)| \exp \left[2\pi i \left(\frac{y w}{M} + \frac{x v}{N} \right) \right].$$

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

Програмна реализация на метода е в среда MATLAB. Блок схема на програмната реализация е представена на следващата фиг.9:



Фиг. 9. Блок схема за корегистрация на изображения посредством корелация

Чрез този метод и използване на спектрална информация в [5] и [6] 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 изрази:

$$(35) \quad \dot{\gamma} = \frac{\sum_{a \in Nr \in K} \sum_{ar} S_{ar}^M (S_{ar}^S)^*}{\left\{ \sum_{a \in Nr \in K} \sum_{ar} S_{ar}^M (S_{ar}^M)^* \times \sum_{a \in Nr \in K} \sum_{ar} S_{ar}^S (S_{ar}^S)^* \right\}^{\frac{1}{2}}}$$

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

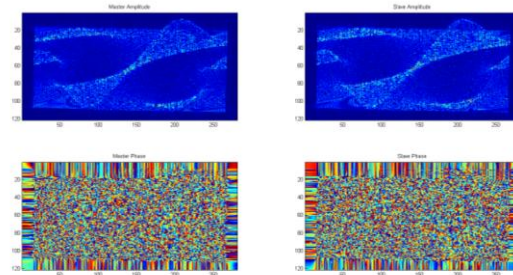
3.2.1. SAR геометрично описание

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 (11) са използвани за моделиране на SAR сигнали, отразени от повърхността на сложен релеф, вж. израз (3) и изобразен на Фиг.6.

3.2.2. Алгоритъм за възстановяване на образа от комплексно SAR изображение

Изображението на наблюдавания район на интерес ще бъде възстановено в момента $p = N/2$, което отговаря на половината от 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.

Алгоритъмът за възстановяване на SAR изображението, представен в изрази от (12) до (19), се използва за генериране на две комплексни изображения - главно и подчинено (Фиг.10).



Фиг. 10. (а) Амплитуда и фаза на главното изображение, (б) Амплитуда и фаза на подчиненото изображение.

3.2.3. Изчисляване на кохерентната карта и интерферограмата

Главното комплексно изображение може аналитично да бъде представено с изрази:

$$(36) \quad \begin{aligned} \dot{A}_M &= A_M \cdot e^{i\Phi_M} = \text{Re}(\dot{A}_M) + j \text{Im}(\dot{A}_M) \\ A_M &= \sqrt{\text{Re}^2(\dot{A}_M) + \text{Im}^2(\dot{A}_M)} \\ \Phi_M &= \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{A}_M)}{\text{Re}(\dot{A}_M)}\right) \end{aligned} ,$$

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

Подчиненото комплексно изображение може аналитично да бъде представено с израз:

$$\begin{aligned} \dot{A}_s &= A_s \cdot e^{i\Phi_s} = \text{Re}(\dot{A}_s) + j \text{Im}(\dot{A}_s) \\ (37) \quad A_s &= \sqrt{\text{Re}^2(\dot{A}_s) + \text{Im}^2(\dot{A}_s)} \quad , \\ \Phi_s &= \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{A}_s)}{\text{Re}(\dot{A}_s)}\right) \end{aligned}$$

където A_s е амплитудата, а Φ_s е фазата на подчиненото комплексно изображение.

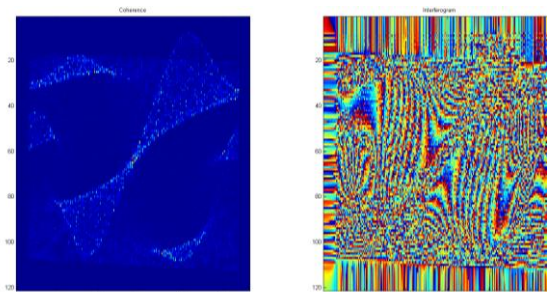
Главното (36) и подчиненото (37) комплексни изображения генерират комплексна интерферограма, посредством комплексно спрегнатото им умножение, т.е.

$$(38) \quad \dot{I} = \dot{A}_M * \dot{A}_s^* = A_M \cdot e^{i\Phi_M} A_s \cdot e^{-i\Phi_s} = A_M A_s \cdot e^{i(\Phi_M - \Phi_s)}$$

Модулът на комплексната интерферограма (38) ни дава кохерентната карта, докато фазата е действителната интерферограма. Това е представено чрез израз (39):

$$\begin{aligned} (39) \quad Coh &= A_M A_s = \sqrt{\text{Re}^2(\dot{I}) + \text{Im}^2(\dot{I})} \\ Int &= \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{I})}{\text{Re}(\dot{I})}\right) \end{aligned}$$

Експерименталните резултати са илюстрирани на Фиг. 11. Във Фиг. 11, б може да бъде наблюдавана деформацията породена от изменението на наблюдаваната земна повърхност.



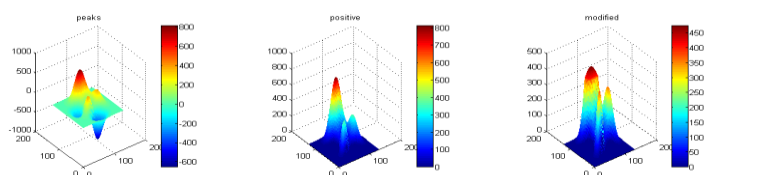
Фиг. 11. (а) Кохерентна карта, (б) Интерферограма.

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

3.3.1. Моделиране на земна повърхност и последвала деформация на района.

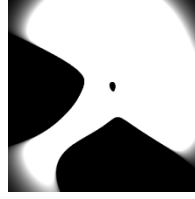
Съхраняване на данните в GEO TIFF файлове

Изразите от (1) до (11) са използвани за моделиране на SAR сигнали, отразени от повърхността на сложен релеф. Фиг.12



Фиг. 12. (а) Земна повърхност, (б) положителни стойности, (в) деформация.

Моделирани са три повърхности: първоначална, с положителни стойности и деформирана. Записани са в GEO TIFF [7], [8], който има следния общ вид Фиг.13.



Фиг. 13. Общ вид на GEO TIFF файл.

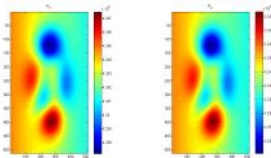
3.3.2. Симулация на сателитна интерферометрична система, използваща радио локационна станция със синтезирана апертура

Повърхнината се наблюдава със SAR сателитна система, разположена на два космически носители. Разстоянията от двата спътника до всяка точка от изследваната земна повърхност се определят от изразите:

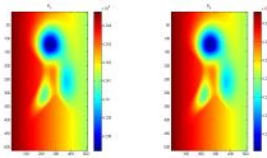
$$(40) \quad \begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(S_{1x} - X)^2 + (S_{1y} - Y)^2 + (S_{1z} - Z)^2} \\ R_2 &= \sqrt{(S_{2x} - X)^2 + (S_{2y} - Y)^2 + (S_{2z} - Z)^2} \end{aligned}$$

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

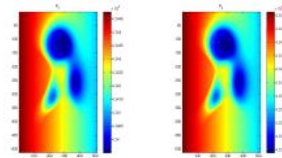
Графичното описание в *pseudo color map* на разстоянията R_1 и R_2 от сателитите до трите типа повърхности (*повърхността само с положителни стойности и деформираната повърхност с положителни стойности*) са представени съответно на Фиг. 14, Фиг.15 и Фиг.16.



Фиг. 14. Разстояния до първоначалната повърхност.



Фиг. 15. Разстояния до повърхността с положителни стойности.



Фиг. 16. Разстояния до деформираната повърхност с положителни стойности.

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

$$(41) \quad P_{\text{wrapped}} = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1), \text{ където } \lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{f}, \quad f = 3 \cdot 10^9.$$

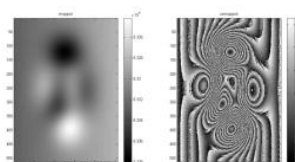
Операция по намиране на разгънатата фаза (*още така наречената разстелена фаза*) се определя от израза:

$$(42) \quad P_{\text{unwrapped}} = P_{\text{wrapped}} - 2\pi(\max(K)),$$

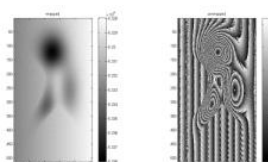
където K е цялата част на израза:

$$(43) \quad K = \left\lceil \frac{2}{\lambda} (R_2 - R_1) \right\rceil.$$

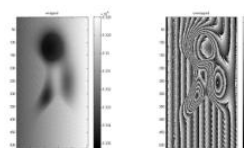
Квази SAR интерферограми със свити фази (*интерферометричните кръгове*) и разстелените фази, съответстващи на релефа на трите повърхнини (*първоначално моделираната повърхност, повърхността само с положителни стойности и деформираната повърхност с положителни стойности*), са представени, съответно на Фиг. 17, Фиг.18 и Фиг.19.



Фиг. 17. Квази интерферограма до първоначалната повърхност



Фиг. 18. Квази интерферограма до повърхността с положителни стойности



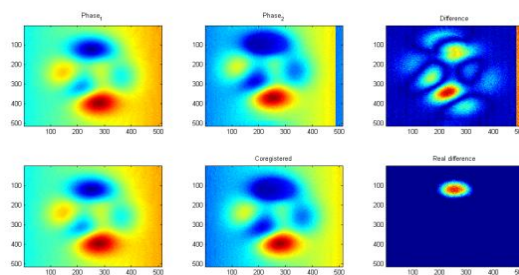
Фиг. 19. Квази интерферограма до деформираната повърхност с положителни стойности.

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

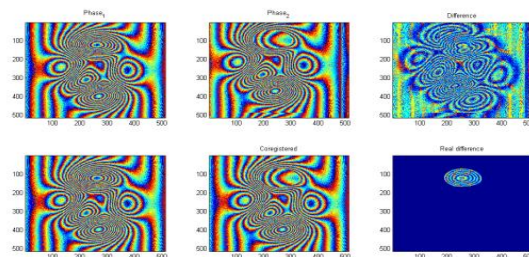
С цел илюстрация на процеса на корегистрация на двата SAR образа, се въвежда преднамерено отместване в разстоянията до всеки пиксел, както следва 5% нагоре и 5% наляво.

3.3.4. Корегистрация и диферентна интерферограма

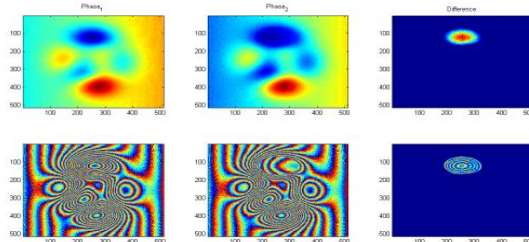
Метод за съвместна корегистрация на две изображения: главно и подчинено е представен математически в изрази от (27) до (34). Алгоритъм за ефективна подпикселна регистрация на изображенията посредством крос-корелационна процедура с цел корегистрация е посочен в източник [9] и [10]. Генерираната квази интерферограма, демонстрираща изменението в релефа след настъпилата деформация е показан на Фиг.20, 21 и 22.



Фиг. 20. Разстелени фази и тяхната диферентна.



Фиг. 21. Свити фази и тяхната диферентната.



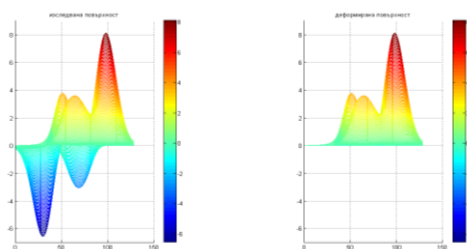
Фиг. 22. Свити и разстелени фази и техните диферентни.

Резултатната диферентна фаза показва ясно извършената деформация.

3.4.SAR интерферограми и диферентни интерферограми - числени експерименти

3.4.1. SAR интерферограми и диферентни интерферограми при различни базови линии

Моделирана е земна повърхност израз (3) и е извършена деформация (Фиг.23).

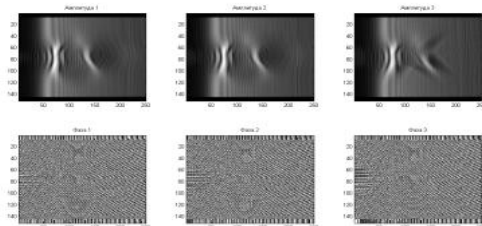


Фиг. 23. (а) Земна повърхност, (б) положителни стойности на релефа.

Повърхнината се наблюдава със SAR система, разположена на три сателитни носителя. Базовата линия между първите два е 10 метра, а между вторите 20 метра. Изразите от (1) до (11) са използвани за моделиране на комплексни SAR сигнали. Възстановяване на комплексното изображение чрез двукратна изчислителна процедура на бързо преобразование на Фурие, изрази (12) и (13).

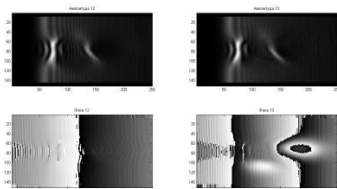
За целите на интерферометричната диференциална обработка на комплексните изображения е необходима корегистрация. Използван е алгоритъм за ефективна под-пикселна регистрация на изображенията посредством крос-корелационна процедура, математически изрази от (27) до (34). Корегистрационната процедура се 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.24 са илюстрирани амплитудите и фазите на комплексните трите SAR изображения след възстановяването на образа и тяхната съвместна корегистрация.

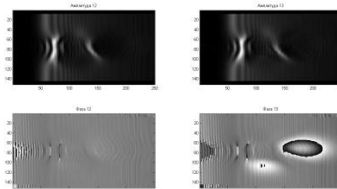


Фиг. 24. Визуализация на получените комплексни сигнали: амплитуда и фаза.

Интерферограмата се изчислява с израз (21), а диферентната интерферограма с изрази (22) и (23). Фиг.25 и Фиг.26 визуализират така получените амплитуда (кохерентна карта) и фаза (интерферограма) от двете комплексни интерферограми, наименувани за краткост 12 и 13.

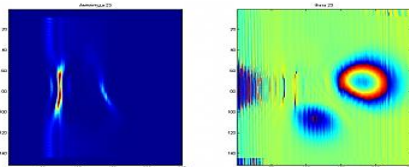


Фиг. 25. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения преди ефективна подпикселна корегистрационна процедура.



Фиг. 26. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения след ефективна подпикселна корегистрационна процедура.

Извлечените амплитуда и фаза от комплексната диферентна интерферограма са представени на Фиг.27.



Фиг. 27. Амплитуда и фаза извлечени от комплексната диферентна интерферограма.

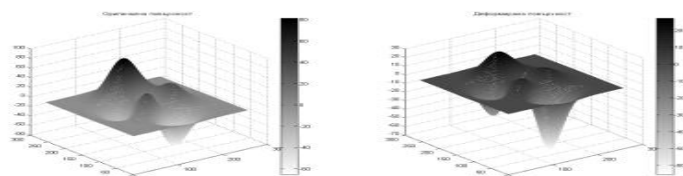
Формирани са три комплексни изображения, две комплексни интерферограми и една диферентна комплексна интерферограма. Изследвано е влиянието на различни базови линии върху SAR интерферограмите и диферентните интерферограми. В табличен вид са представени амплитудни и фазовите компоненти, участващи в комплексните изображения от трите радиолокационни InSAR сателитни системи, също са

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

Посочените времена за изпълнение на предложения алгоритъм са зависими от апаратната и програмната част на съответната компютърна система. В случая бе използван лаптоп марка Асер модел Aspire номер 5755G.

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

Моделирана е земна повърхност израз (3) и е извършена деформация (Фиг.28).



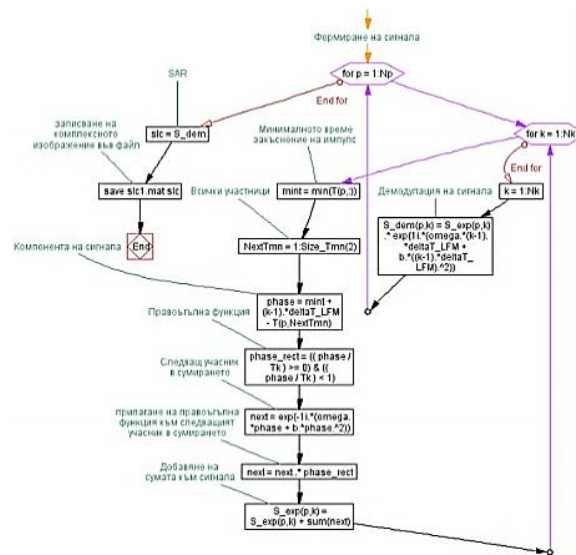
Фиг. 28. (а) Наблюдавана повърхност, (б) деформирана повърхност.

Повърхнината се наблюдава със SAR система, разположена на три сателитни носителя. Базовата линия между първите два е 1500 метра, а между вторите е 1200 метра.

Изразите от (1) до (11) са използвани за моделиране на комплексни SAR сигнали. Реализацията в програмна среда MATLAB на алгоритъма за формиране на SAR сигнала е даден в Табл. 2. Блок схема на алгоритъма за формиране на SAR сигнал е представена на Фиг.29.

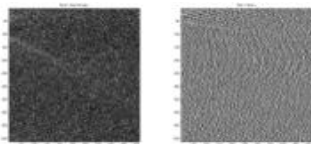
1	% Формиране на сигнала
2	for p = 1:Np
3	for k = 1:Nk
4	% Минималното време закъснение на импулс
5	mint = min(T(p,:));
6	% Всички участници
7	NextTmn = 1:Size_Tmn(2);
8	% Компонента на сигнала
9	phase = mint + (k-1).*deltaT_LFM - T(p,NextTmn);
10	% Правоъгълна функция
11	phase_rect = ((phase / Tk) >=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

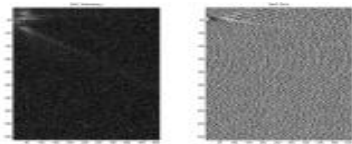


Фиг. 29. Блок схема на формиране на SAR сигнал.

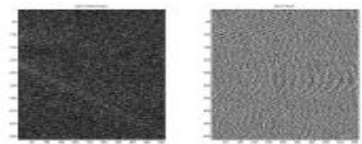
Резултатите от проведения експеримент са показани от Фиг.30 до Фиг.32.



Фиг. 30. (а) Амплитуда, (б) Фаза на първото комплексно изображение.

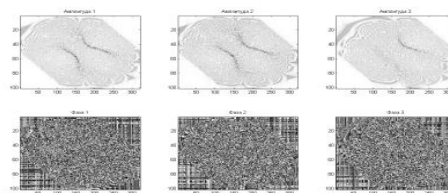


Фиг. 31. (а) Амплитуда, (б) Фаза на второто комплексно изображение.



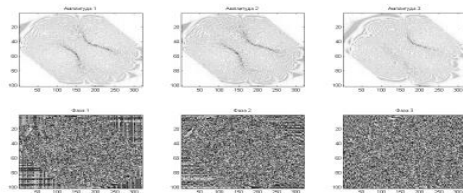
Фиг. 32. (а) Амплитуда, (б) Фаза на третото комплексно изображение.

Възстановяване на комплексното изображение чрез двукратна изчислителна процедура на бързо преобразоване на Фурие, изрази (12) и (11). Получените амплитуди и фази на комплексните SAR сигнали от трите сателитни радиолокационни системи, след възстановяването на изображението са показани на Фиг.33.



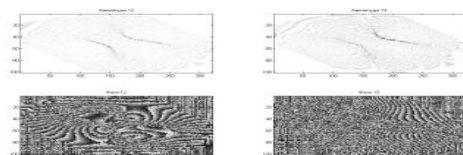
Фиг. 33. Визуализация на получените комплексни сигнали: амплитуда и фаза.

Метод за корегистрация на две изображения: главно и подчинено е представен в изрази от (27) до (34). Получените амплитуди и фази на комплексните SAR сигнали от трите сателитни радиолокационни системи след възстановяването на образа и тяхната корегистрация са показани на Фиг.34.

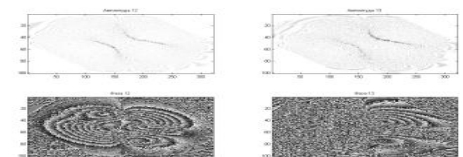


Фиг. 34. Визуализация на получените възстановени изображения: амплитудна и фазова информация след тяхната съвместна корегистрация.

Намиране на фазовите разлики, наречени интерферограма са представени в израз (21). Получаване на диферентна интерферограма е представена в изрази (22) и (23). Фиг. 35 и Фиг.36 визуализират така получените: амплитуда (кохерентна карта) и фаза (интерферограма) от двете комплексни интерферограми, съответно наименувани за краткост 12 и 13.



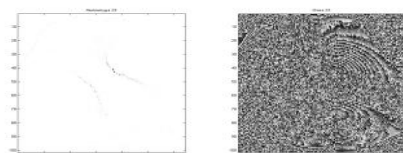
Фиг. 35. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения преди стартиране на ефективна подпикселна корегистрационна процедура.



Фиг. 36. Кохерентни карти (Амплитуди) и интерферограми (Фази) получени от комплексните изображения след стартиране на ефективна подпикселна корегистрационна процедура.

Във фазовия образ на Фиг.37 могат ясно да бъдат открити интерферометричните кръгове, съответстващи на релефа (интерферограма 12) и интерферометричните кръгове, съответстващи на деформацията (интерферограма 13).

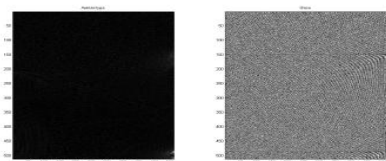
Извлечените амплитуда и фаза от комплексната диферентната интерферограма са представени на Фиг.37



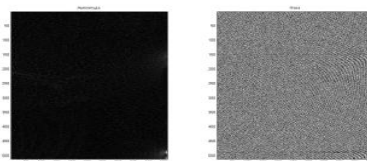
Фиг. 37. Амплитуда и фаза, извлечени от комплексната диферентна интерферограма.

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

Стартирайки предложения в предходната част алгоритъм, получаваме комплексния сигнал като двумерна матрица за всеки един от сателитните носители (Фиг.38 и Фиг.39)



Фиг. 38. (а) Амплитуда, (б) Фаза



Фиг. 39. (а) Амплитуда, (б) Фаза

За възстановяване на комплексното изображение се използва двумерно 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 двумерно преобразуване на Фурие е точно обратната трансформация на Фурие, извършвана върху двете измерения на данните. Формулите за двумерно дискретно преобразуване на Фурие и обратно двумерно дискретно преобразуване на Фурие, са дадени от Университета Райс, както следва:

$$(44) \quad F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})},$$

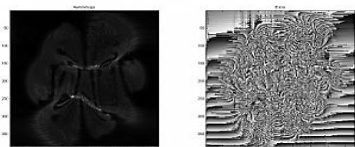
$$(45) \quad f(x, y) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{M-1} F(u, v) e^{j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}.$$

Програмни фрагменти в среда MATLAB за реализацията на тази математика могат да бъдат разгледани в източник [11].

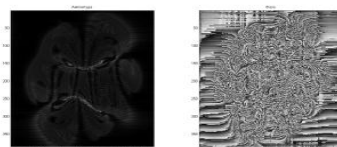
За прилагането на тази трансформация, се предпочита аналог на FFT, който да позволи бързо да се изчислят коефициентите на трансформиране. В действителност двумерното дискретно преобразуване на Фурие може да се отдели в две едно мерни дискретни преобразувания, които могат да бъдат реализирани с FFT алгоритъм (*бързо трансформиране на Фурие*), т.е. в сила е изказа:

$$(46) \quad F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{N-1} e^{-[j\frac{2\pi ux}{N}]} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-[j\frac{2\pi vy}{N}]}$$

На Фиг.40 и Фиг.41 са представени участниците: амплитуда и фаза, извлечени от комплексният сигнал след възстановяване на образа чрез двумерно дискретно преобразуване на Фурие.

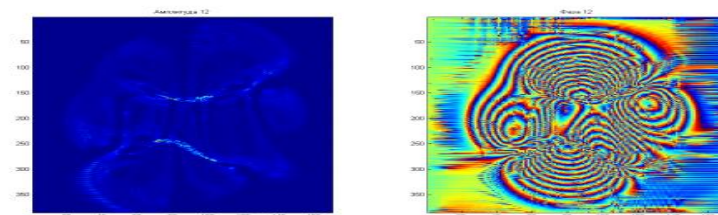


Фиг. 40. (а) Амплитуда, (б) Фаза.



Фиг. 41. (а) Амплитуда, (б) Фаза.

Намиране на фазовите разлики, наречени интерферограма са представени в израз (21). Получаване на диферентна интерферограма е представена в изрази (22) и (23).

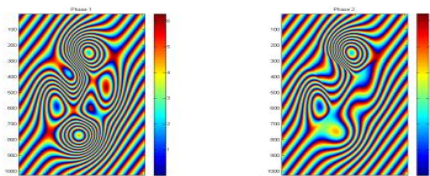


Фиг. 42. Кохерентна карта (амплитуда) и интерферограма (фаза) получени от комплексните изображения.

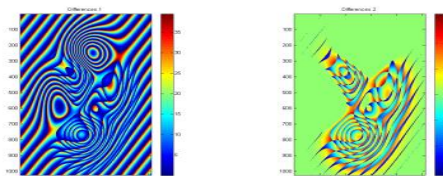
В диферентната интерферограма, показана на Фиг. 42 се открояват интерферометричните кръгове, съответстващи на релефа на изследвания район.

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®. В настоящия експеримент, входните настройващи параметри са максимално идентични с реални параметри на сателита ENVISAT на Европейската агенция за космически изследвания [12]. Единствена радиолокационна система, монтирана на спътников носител изведен в орбита на височина 800 км над земната повърхност. Чрез двукратно облитане на района на интерес с базова линия от 282,8427125 метра за конкретния цифров експеримент. Моделирана е земна повърхност израз (3) и последвала деформация. Реализиран е числен експеримент с квази SAR интерферограми чрез математическите изрази от (40) до (43). Интерферометричната фаза на първоначалната повърхност и интерферометричната фаза на деформираната повърхност са представени на Фиг.43. Съществуващата фазова разлика е представена на Фиг.44.



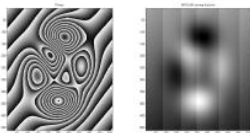
Фиг. 43. (а) фаза на първоначалната повърхност, (б) фаза на деформираната повърхност.



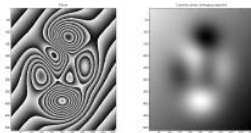
Фиг. 44. Фазова разлика.

За така получената интерферометрична фаза може да се стартират няколко различни процедури за разстилане. Тук са представени следните три алгоритъма: MATLAB® unwrap function; 2D Costantini phase unwrapping based on network programming; 2D Goldstein branch cut phase unwrapping algorithm.

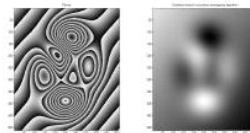
На Фиг.45, Фиг.46, Фиг.47. са представени резултатите от трите алгоритъма за разстилане на фазата, приложени върху получената интерферометрична фаза от първото облитане над изследваната земна повърхност.



Фиг. 45. MATLAB® unwrap function.



Фиг. 46. 2D Costantini phase unwrapping based on network programming.



Фиг. 47. 2D Goldstein branch cut phase unwrapping algorithm.

3.5.Изводи

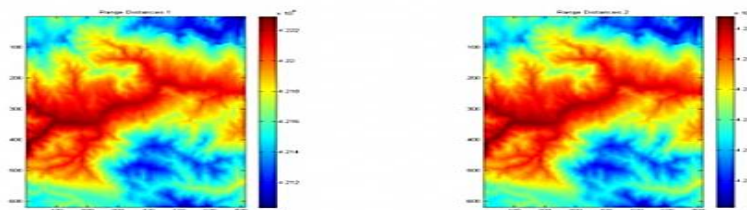
В настоящата глава са разработени математически модели и алгоритми за симулация на SAR сателитна интерферометрична система. На базата на аналитично-геометричната теория на апертурния синтез се дефинира геометрия на InSAR сценария и се предлага модел за реализация на SAR система за генериране на комплексни 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. 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

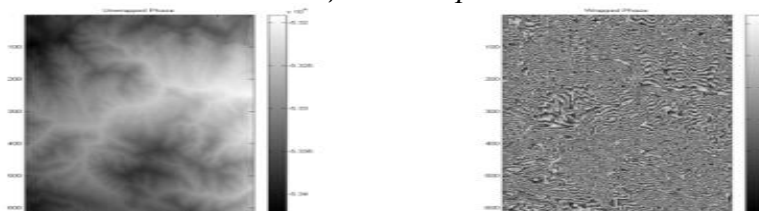
В глава 4 "натурни експерименти с реални сателитни изображения" са извършени пет експеримента с реални сателитни данни.

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

Фиг.49 илюстрира изчислените разстояния от двата сателита до всеки пиксел от повърхността. На Фиг. 49 са показани изчислените: (а) Разстелена фаза, (б) свита фаза.



Фиг. 48. (а) Разстояния от първия сателит до пикселите на повърхността; (б) Разстояния от втория сателит до пикселите на повърхността, представени в псевдо-цветна карта.



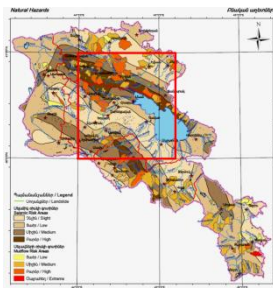
Фиг. 49. (а) Разстелена фаза; (б) Свита фаза.

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

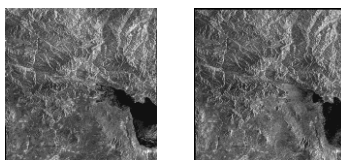
интерферометрична двойка посредством измервания на разстоянията от двете SAR сателитни системи до всеки пиксел от района по време на реконструкцията на SAR образа. От интерферометричната двойка се изчислява разстелена фаза и впоследствие се генерира свита фаза. В резултат се получават интерферометрични 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

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. 50.



Фиг. 50. Карта на национално опасните райони в Армения, Кавказ и областта на проучването са маркирани.



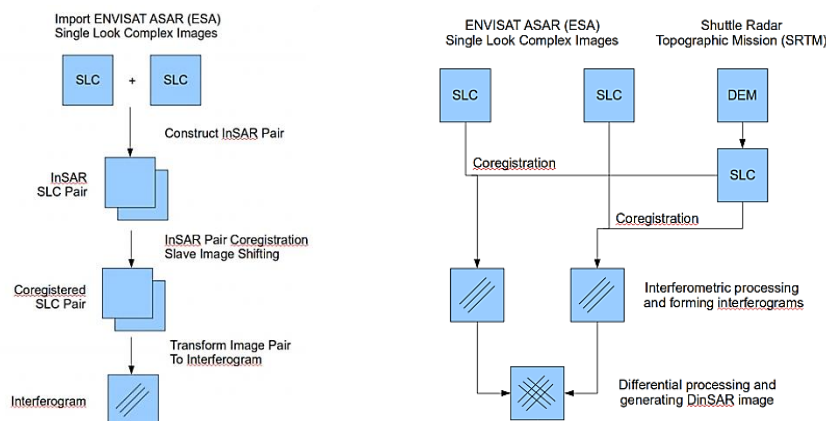
Фиг. 51. Комплексни сателитни изображения от инструмента ASAR на сателита Envisat, както следва: (а) 30 август 2008, (б) 4 октомври 2008).

Комплексните сателитни изображения (Фиг. 51) за настоящото изследване са предоставени от ESA [12]. Сцените покриват площ с размери 100 км x 100 км.

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 участника на изместването и формирането на карта на изместването. Плоската земна повърхност се премахва на първата стъпка след

генерирането на интерферограмата. С цел получаване на интерферометрична фаза на първата стъпка се извършва груба и фина 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. 52. InSAR схема на интерферометричния процес на обработка.

SAR интерферограмата е дву-измерна относителна фаза 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 разстилената фаза, поради нееднозначност. Различни техники за извършване на разстилане на фазата са известни [13], [14], [15]. 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*). Времевият 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

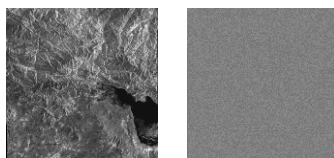
взаимната им корегистрация и генерирането на интерферограмите се получава диферентна интерферограма.

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.

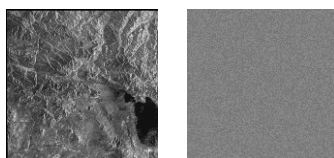
Експериментални резултати

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 Надир е MAS 22,620232 (главно) / SLV 22,594638 (подчинено).

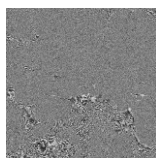
На Фиг.53 са представени: амплитуда (а) и фаза (б) на главното комплексно изображение. На Фиг.54 са представени: амплитуда (а) и фаза (б) на подчиненото комплексно изображение. На Фиг.55. е показана интерферометрична фаза след изваждане на плоската повърхност. На Фиг.56 е показана осреднена амплитуда и фаза заедно с интерферометрична фаза след изваждане на плоската повърхност. Тук интерферометичните кръгове ясно показват релефа. На Фиг.57 е показана интерферометрична кохерентна карта, което показва взаимно-свързаността между корегистрираните комплексни изображения (*наричана още степен на кохерентност*). На Фиг.58 е показана диферентната фаза. На Фиг.59 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.



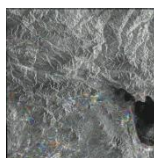
Фиг. 53. Главно комплексно изображение (а) Амплитуда, (б) Фаза.



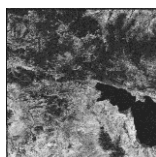
Фиг. 54. Подчинено комплексно изображение (а) Амплитуда, (б) Фаза.



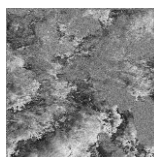
Фиг. 55. Интерферометрична фаза след изваждане на плоската повърхност.



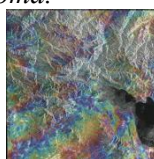
Фиг. 56. Осреднена амплитуда и фаза заедно с интерферометрична фаза след изваждане на плоската повърхност.



Фиг. 57. Интерферометрична кохерентна карта.



Фиг. 58. Диферентна фаза.



Фиг. 59. Осреднена средна амплитуда заедно с диферентна фаза - DInSAR.

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

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 [16].

Карта на свлачищата в Република Армения е представена на Фиг.60.



Фиг. 60. Карта на свлачищата на територията на Република Армения.

В това изследване е използвана InSAR техника за получаване на интерферограма. Данните от сателита ENVISAT инструмент ASAR са представени в (Табл.3).

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. 3. Списък на използваните продукти.

Табл.4 илюстрира амплитудите и фазите на оразмерените комплексни изображения в съотношение 1:5, както следва: 33985A, 33985P, 34986A, 34986P, 38494A, 38494P, 40498A, 40498P.

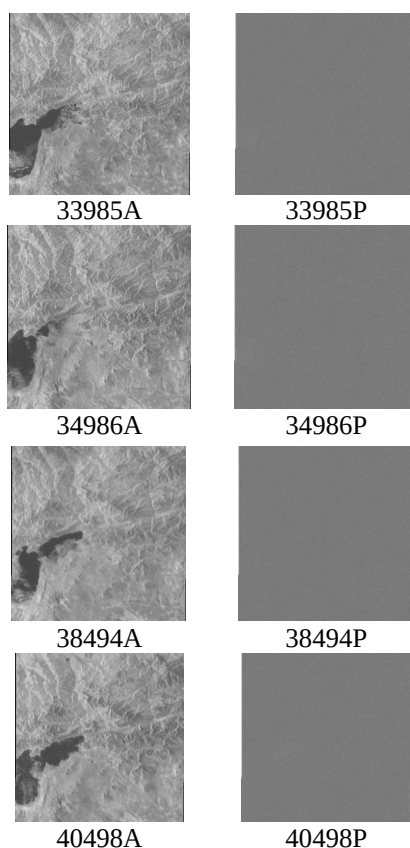


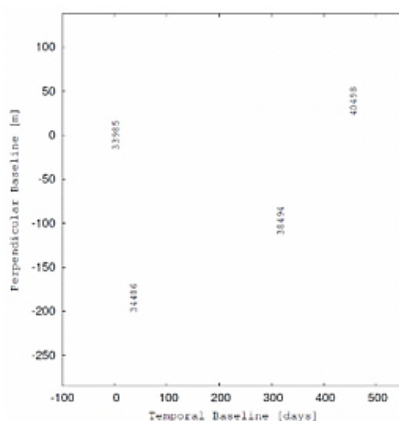
Табл. 4. Оразмерени комплексни изображения.

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. 5 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. 3*) на използваните комплексни изображения.

0	0	33985
35	-185,3	34486
315	-96,9	38494
455	38,1	40498

Табл. 5. Оценка на базовите линии на комплексните изображения.

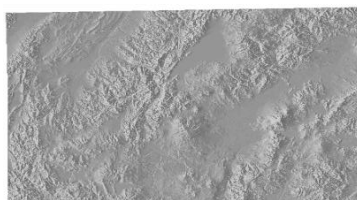
Фиг.61 графично илюстрира по оста Ох перпендикулярната базова линия (*в метри*), по оста Оу е времевата базова линия (*в дни*).



Фиг. 61. Графика на перпендикулярни и времеви базови линии.

Прилагане на цифров модел на релефа

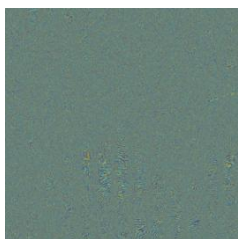
За целите на диферентната интерферометрична обработка е използван цифров модел на релефа от SRTM3 мисията на NASA. Той предоставя височинна карта с резолюция 30 метра. На Фиг.62 е показан обединения цифров модел на релефа. Картата покрива цялата територия на разглеждания район на интерес.



Фиг. 62. Обединен цифров модел на релефа.

Резултати от изображенията и интерферометричното изследване

В съвкупността от Фиг.63 до Фиг.77 по-долу са дадени резултати от интерферометричната обработка както следва: лява колона 33985-34986, средна колона 33985-38494, дясна колона 33985-40498.



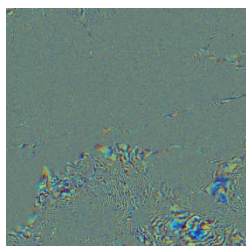
Фиг. 63. 33985-34486 -
Комплексна
интерферограма.



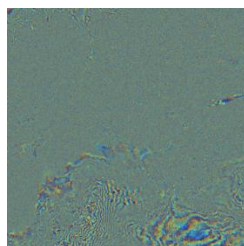
Фиг. 64. 33985-38494 -
Комплексна интерферограма.



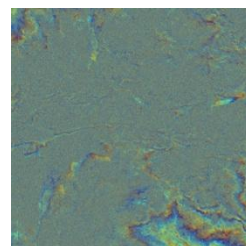
Фиг. 65. 33985-40498 -
Комплексна
интерферограма.



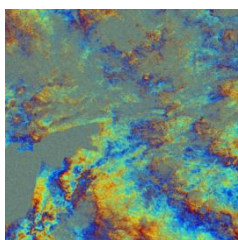
Фиг. 66. 33985-34486 -
Оплоскостена
интерферограма.



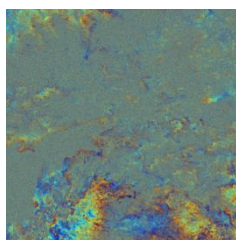
Фиг. 67. 33985-38494 -
Оплоскостена интерферограма.



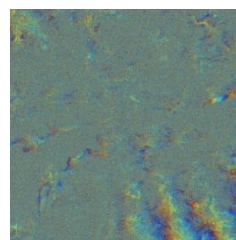
Фиг. 68. 33985-40498 -
Оплоскостена
интерферограма



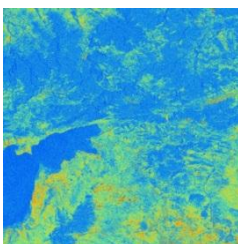
Фиг. 69. 33985-34486 –
Интерферограма с
премахната топография.



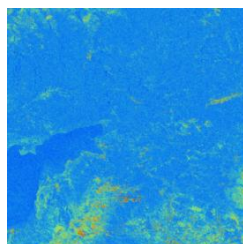
Фиг. 70. 33985-38494 –
Интерферограма с премахната
топография.



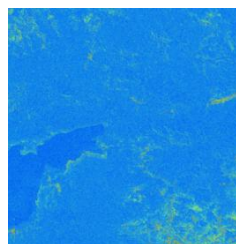
Фиг. 71. 33985-40498 –
Интерферограма с
премахната топография.



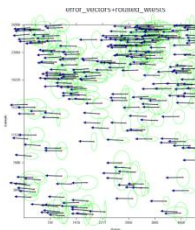
Фиг. 72. 33985-34486 –
Кохерентна Карта.



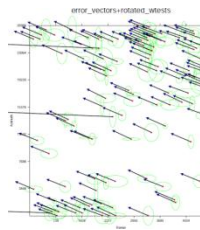
Фиг. 73. 33985-38494 –
Кохерентна Карта.



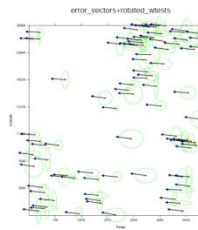
Фиг. 74. 33985-40498 –
Кохерентна Карта.



Фиг. 75. 33985-34486 –
Вектори на грешки и
ротация.



Фиг. 76. 33985-38494 –
Вектори на грешки и
ротация.



Фиг. 77. 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).

Сравнителния 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

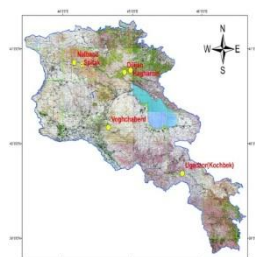
В това изследване са описани резултати от работата на международен екип от Бургаски свободен университет (БСУ) и Ереванския държавен университет (ЕДУ) в рамките на проект на НАТО, номер CLG: ESP.EAP.CLG. 983 876). Генерирани са цифрови модели на релефа за избрани области от Армения с високо ниво на риск, 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.



Фиг. 78. Свлачищни райони с високо ниво на риск в Армения.

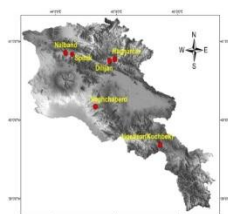
Name of landslide	Latitude (Northern breadth)	Longitude (East longitude)
Voghchaberd	40° 10' 00"	44° 39' 10"
Dilijan	40° 45' 10"	44° 53' 15"
Ughedzor (Kochbek).	39° 41' 00"	45° 43' 00"

Табл. 6. Координати на най-активните свлачища в Армения.



Фиг. 79. Растер на топографската карта на Армения в размер 1:100000.

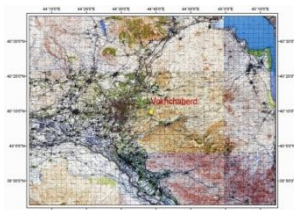
За създаването на цифрови модели на релефа на териториите в риск е използван цифров модел на релефа на Армения (Фиг.80), взет от *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* [17] инструмента на сателита Тегга (достъпен за 99% от Земята), който представя височината с резолюция 30 метра [18], [19], [20].



Фиг. 80. 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 [21], [22] беше избрана площ от 100 x 100 км (Фиг.81) около свлачището на следните координати: ширина: 40010' 00" и дължина: 44039' 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.82).

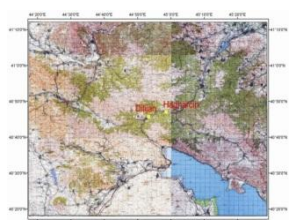


Фиг. 81. Свлачище Voghchaberd на топографската карта на Армения.

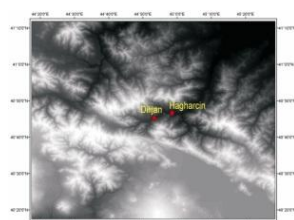


Фиг. 82. Цифров модел на релефа на свлачището Voghchaberd.

За свлачището Dilijan по топографска карта на Армения [21], [22] беше избрана площ от 100 x 100 км (Фиг.83) около свлачището на следните координати: ширина: 40045' 10" и дължина: 44043' 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.84)



Фиг. 83. Свлачище Dilijan на топографската карта на Армения.

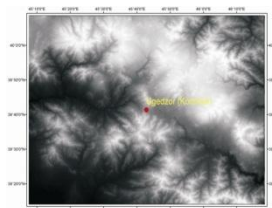


Фиг. 84. Цифров модел на релефа на свлачището Dilijan.

За свлачището Ughedzor (Kochbek) от топографска карта на Армения [21], [22] беше избрана площ от 100 x 100 км (Фиг.85) 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.86).

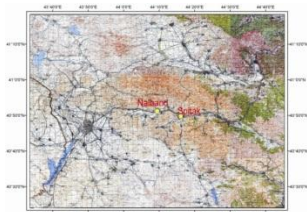


Фиг. 85. Свлачище Ughedzor (Kochbek) на топографската карта на Армения.

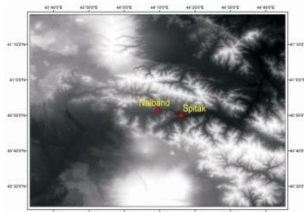


Фиг. 86. Цифров модел на релефа на свлачището Ughedzor (Kochbek).

За свлачищната зона на земетресението Spitak [23], [24], [25] от топографска карта на Армения [21], [22] беше избрана площ от 100 x 100 км (Фиг.87) 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.88).



Фиг. 87. Свлачищна зона на земетресението Spitak на топографската карта на Армения.



Фиг. 88. Цифров модел на релефа на свлачищната зона на земетресението Spitak.

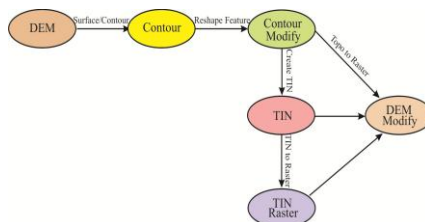
С цел генерирането на синтезирани интерферограми и синтезирани диферентни интерферограми е симулирано земно изместване, причинено от естествени природни бедствия в избраните райони с високо ниво на риск.

В рисковите зони са избрани свлачищата, които зависят от релефа, местната геоложката структура и свойства на композитните скали. Избраните свлачищни 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 м (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.89.

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 (Kochbek) (съответстващи координати на неговия център: 39° 40' 49"; 45° 42' 45") се намират от дясната страна на високоскоростен път Vayk-Sisian,

където тези измествания са насочени на: север, североизток. Изместените части в района Voghchaberd (съответстващи координати на техните центрове: $39^{\circ} 40' 49''$; $45^{\circ} 42' 45''$) са на 0.7 км на изток, североизток от селото Voghchaberd. Изместените части на зоната на земетресението Spitak [23], [24], [25] (съответстващи координати на техните центрове: $40^{\circ} 52' 30''$; $44^{\circ} 10' 58''$) са на 3 км разстояние на изток от село Nalband и 8 км на северозапад от град Spitak, като изместването е насочено на юг.



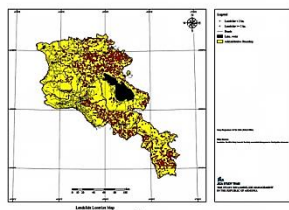
Фиг. 89. Граф на генерирането на модифициран цифров модел на релефа.

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 интерферометричният 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

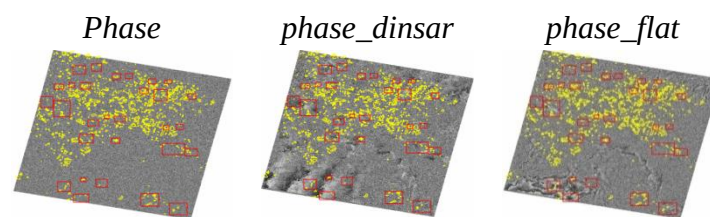
Задача: Изследване на интерферограмите, осигурени от българската работна група, които са получени от обработката на изображения от сателита ENVISAT на някои части от територията на Армения. Да се потвърди или отхвърли точността на свлачища, посочени от спътниковите данни в тези части. Те наистина ли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

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* [26] (вж. Фиг.90). Основно чрез използване на географски информационни системи (GIS), участниците от арменската група сравниха геореферирани изображения и визуално избраха зони на свлачищни явления, които са в формата на ЛСА за територията на Армения.



Фиг. 90. Свлачищни явления в Армения според изследването на организацията ЛСА.

В резултат от това сравнение избрани части от геореферираните интерферограми напълно съвпадат със свлачищните зони, определени от ЛСА (Фиг.91).



Фиг. 91. Зони с пълно съвпадение на свлачищни явления, според JICA.

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. АВТОРСКА СПРАВКА

5.1. 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 двуменсионна бърза Фурие трансформация на две комплексни изображения.

5.2. 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.

5.3. 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.

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.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] MATLAB®. [Online]. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
- [2] A.D. Lazarov, Ch. N. Minchev., "Cluster Micro-satellite InSAR Model.," in SSW, Istanbul, 2008.
- [3] 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.
- [4] Andrea Monti-Guarnieri, Cl. Prati, F. Rocca, Didier Massonnet Ferretti Al., The Netherlands: ESA Publications, 2007.
- [5] 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.
- [6] Manuel Guizar-Sicairos, Samuel T. Thurman, James R. Fienup, "Efficient subpixel image registration algorithms," *Opt. Lett.*, vol. 33, pp. 156-158, 2008.
- [7] geotiffwrite. [Online]. <http://www.rotman-baycrest.on.ca/~jimmy/geotiffwrite/>
- [8] Matlab geotiff. [Online]. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27959>
- [9] Samuel T. Thurman, and James R. Fienup Manuel Guizar-Sicairos, "Efficient subpixel image registration algorithms," *Opt. Lett.* 33, pp. 156-158, 2008.
- [10] efficient-subpixel-image-registration-by-cross-correlation. [Online]. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/18401-efficient-subpixel-image-registration-by-cross-correlation>
- [11] Matlab DFT. [Online]. http://www.clear.rice.edu/elec301/Projects01/image_filt/matlab.html
- [12] ESA. ESA. [Online]. <http://www.esa.int/>
- [13] R., Adam, N., Davidson, G.W., et al. Bamler, "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.
- [14] R. Gens, "Two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry: developments and new challenges," *Int. J. Remote Sensing*, vol. 24, pp. 703-710, 2003.
- [15] A. Siegel, "Least squares unwrapping with iterative corrections.," *Proceedings of IGARSS_99, IEEE Cat. Nr. 99CH36293*, pp. 2398-2400, 1999.
- [16] S.Hakobyan, K.Jenderedjian, S.Muradyan, M.Voskanov A.Babayan, *Lake Sevan – Experience and Lessons Learned Brief.*, 2006.
- [17] Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer. [Online]. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>

- [18] Wise S., "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.
- [19] Heritageb G., Largec A. and I. Fuller Milana D., "Filtering spatial error from DEMs: Implications for morphological change estimation," *Journal of Geomorphology*, vol. 125, no. 1, pp. 160-171, 2011.
- [20] J. Seibert Sorensen R., "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.
- [21] Stepanyan V.E., Khachatryan D.A. et al. Boynaghryan V.R., "Landslides in Armenia," *ASOGHIK*, p. 308, 2009.
- [22] 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.
- [23] Arefiev S. and Rogozhin E. Dorbath K., "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.
- [24] 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.
- [25] Aptekman Zh., Afimina T. et al. Arefiev S., "Catalog of Aftershocks of the Spitak," *Earthquake, Fiz. Zemli*, vol. 11, pp. 60-73, 1991.
- [26] Japan International Cooperation Agency. [Online]. <http://www.jica.go.jp/english/>
- [27] A. Lazarov, D. Minchev, G. Aleksanyan, M. Ilieva, "Landslide phenomena in sevan national park – Armenia," in *ESA Living Planet 2010*, Bergen, Norway, 2010.
- [28] 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.
- [29] A. Lazarov, D. Minchev, "SAR mapping equations and coordinate transformations," *BFU, Siela*, 2009.
- [30] A. Lazarov, D. Minchev, "SAR Imaging Model," *BFU, Conference*, 2010.
- [31] A. Lazarov, D. Minchev, "SAR pseudo differential interferogram modeling," *BCV, Conference*, 2011.