



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И КОМУНИКАЦИОННИ
ТЕХНОЛОГИИ

Тодор Павлов Костадинов

МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА ОБРАБОТКА НА SAR И ISAR ИЗОБРАЖЕНИЯ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

НА ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на образователната и научната степен „доктор“

по научна специалност 01.01.12 „Информатика и компютърни науки“

Научни ръководители:

Проф. дтн. Андон Димитров Лазаров

Проф. дтн. Христо Августов Кабакчиев

София, 2013 г.

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на секция „Математически методи за обработка на сензорна информация“ на ИИКТ-БАН, състояло се на 15 Юли 2013 г.

Дисертацията съдържа 170 стр., в които 175 фигури, 1 таблица и 8 стр. литература, включваща 123 заглавия и 1 приложение.

Защитата на дисертацията ще се състои на201... г. от часа в залана блок 25А на ИИКТ-БАН на открито заседание на научно жури в състав:

1. Доц. Иван Гарванов
2. Доц. Вера Бехар
3. Проф. д-р Андон Лазаров
4. Проф. Атанас Начев
5. Доц. Чавдар Минчев

Материалите за защитата са на разположение на интересуващите се в стая 215 на ИИКТ-БАН, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 25А.

Автор: *Тодор Павлов Костадинов*

Заглавие: *МЕТОДИ И АЛГОРИТМИ ЗА ОБРАБОТКА НА SAR И ISAR ИЗОБРАЖЕНИЯ*

Обща характеристика на дисертационния труд

Актуалност на темата и критичен анализ на съвременното състояние на проблемите, предмет на труда.

Бързите темпове на развитие в технически план на изчислителните системи през последните десетилетия, дава възможност за ефективно моделиране и изследване на процесите в радиолокационни системи с права – SAR (Synthetic Aperture Radar) и инверсна ISAR (Inverse Synthetic Aperture Radar) синтезирана апертура, включително топологични и сигнални модели. Наличието на голям брой орбитиращи около земната повърхност спътници допринася за ускореното развитие на методите за дистанционно наблюдение и задоволява нуждата от системи за откриване и разпознаване. Съвкупността от посочените фактори обуславя разширеното търсене и необходимост от разработване на съвременни методи за наблюдение на целеви обекти на база на SAR и ISAR радиолокационни системи за нуждите на военното дело, безопасно наблюдение на отдалечени, противникови или гранични територии, развитие на космическите програми, разширяване на възможностите за геодезични изследвания, изобразяване на особеностите на релефа и териториално наблюдение. Необходимостта от системи за охрана, превенция и наблюдение на открити площи също до голяма степен се обхваща от гореспоменатите системи.

С нарастване на възможностите на изчислителните системи се създава база за съставяне на сложни математически модели, тяхната реализация и оптимизация, внасяне на гъвкавост в процеса на проектиране и свобода на изпълнението. Поставя се задачата за повишаване на разрешаващата способност на изображенията чрез прилагане на оптимизационни изчислителни процедури, както и нейното привеждане във вид удобен за алгоритмизация и програмна реализация. За изпълнение на поставената цел могат да се използват редица взаимно-заменяеми оценъчни и компресиращи алгоритми, чиято производителност може да бъде съпоставяна. Изчислителната техника позволява използване на интуитивни и самонастройващи се алгоритми, които дават възможност за изключително точно възпроизвеждане на описваните функции, явления и процеси. Това разкрива реалните възможности на съвременните програмни езици от високо ниво за дефиниране на гореспоменатите алгоритми и повишаване на бързодействието им. Това удовлетворява нарастващите нужди на радиолокацията, а именно – синтез на сигнали с различни честоти, тип модулация, шумоустойчивост и продължителност. В това число и пространствените характеристики класифициращи методите и обособяващи отделните системи в зависимост от кинематичните им особености, филтриране на приетите сигнали в зависимост от конфигурацията и методи за тяхната обработка и възстановяване.

За успешната реализация и оптимизация на функциите на радиолокационните системи със синтезирана апертура е необходимо да се използват подходящи методи за решение на проблемите, свързани с описанието на геометричните и кинематични особености на двата основни типа системи – системите с права синтезирана апертура – SAR, при които азимутална разделителна способност се получава при относителното радиално преместване на наблюдавания обект по отношение на подвижна система на наблюдение и радиолокационните системи с инверсна синтезирана апертура – ISAR, при които разделителна способност се получава при радиалното отместване на наблюдавания обект, по отношение на неподвижна система за наблюдение.

От анализа на съвременното състояние на проблемите, свързани с радиолокационните системи със синтезирана апертура следва изводът, че са изследвани топлогии на системите с прав апертурен синтез – SAR и обратен апертурен синтез

ISAR, разнообразие от геометрични конфигурации, методи за реконструкция и подобряване на качеството на изображенията. Независимо от това следва да се отбележи, че все още не са изследвани голям брой кинематични разновидности на бистатичните системи със синтезирана апертура (BSAR, BISAR) и тяхното приложение. Дифракционният проблем при бистатичен с ъгъл между предавател-обект-приемник, близък до 180° изисква още по-детайлно изследване. Остава открит проблемът по оптимизация на геометричните, кинематичните и сигналните модели при апертурния синтез, алгоритмите за възстановяване, оценка и подобряване на качеството на изображението на база на интуитивни методи с приложение на ентропийна оценъчна функция. Интерес представлява проблемът по оценка на кинематичните параметри на движещи се обекти чрез използване на данни от измерванията при апертурния синтез.

Цел и задачи на дисертационния труд

Основната цел на дисертационен труд е разработване на математически модели на различни топологии на радиолокационните системи, които прилагат принципа на апертурния синтез, на високоинформативни радиолокационни сигнали, отразени от движещи се обекти със сложна геометрия, изграждане на алгоритми за реконструкция и фокусировка на изображенията.

Целта на дисертационния труд се постига чрез решение на следните основни задачи.:

1. Критичен анализ на съвременното състояние на проблемите, предмет на дисертационния труд.
2. Аналитично описание на топологиите на радиолокационните системи със синтезирана апертура ISAR, BSAR, InSAR, BFSAR.
3. Математическо моделиране на радиолокационните сигнали, отразени от обекти със сложна конфигурация и програмно осигуряване на процеса на формиране на сигналите.
4. Изграждане на алгоритми за реконструкция на изображенията на наблюдаваните обекти, фокусировка на изображенията и програмно осигуряване.
5. Числени експериментирание на разработените геометрични и сигнални модели и алгоритмите за възстановяване на изображенията.

Методология на изследването

Методологията на изследвания в дисертационния труд се основава на:

- Аналитично описание на топологиите на радиолокационни системи със синтезирана апертура чрез прилагане на инструмента на линейната алгебра, аналитичната геометрия и теоретична механика.
- Моделиране на комплексни радиолокационни сигнали, отразени от обекти със сложна геометрична конфигурация чрез прилагане на инструмента на функционалния анализ.
- Алгоритмизация на изчислителните процеси за реконструкция на изображенията на наблюдаваните обекти
- Програмиране на основните изчислителни операции по синтеза на комплексните сигнали, тяхната обработка при реконструкция на изображенията и числено експериментирание в среда на програмния език Matlab.

Апробация на резултатите

Резултатите, включени в дисертацията с докладвани в научна сесия International conference of telecommunications and remote sensing, София 2012, годишник на Бургаския Свободен Университет, Бургас 201, 14th International Radar Symposium IRS2011, Leipzig 2011 (резултатите са изнесени от автор), 15th International Radar Symposium, Dresden 2013 (резултатите са изнесени от съавтор), научна сесия Journal of Applied Magnetizm, Greece 2013, списание Advanced Shipping and Ocean Engineering 2012, Radar 2011, China 2012 (резултатите са изнесени от съавтор).

Списък от публикациите по дисертационния труд

- [1] Kostadinov, T.P., Lazarov, A.D. "BSAR Signal Modeling and SLC Image Reconstruction" In proceedings, ICTRS, Sofia, Bulgaria 20 August 2011.
- [2] [Lazarov, A.D., Kabakchiev, C., Gashinova, M., Kostadinov, T. "Ultra wide band bistatic forward scattering inverse synthetic aperture radar imaging", 14th International Radar Symposium IRS2011, proceedings, page 91-96, ISBN 978-3-927535-28-2, Leipzig, Germany 7-9 September 2011.
- [3] Lazarov, A.D., Kabakchiev, C.A., Kostadinov, T.P. "Short Time Pulse Bistatic Forward Scattering Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging", Dresden, Germany, June 19-21, 2013.
- [4] Lazarov, A., Kostadinov, T. "SAR Signal Modeling and Imaging of a Moving Target", Radar 2011 IEEE CIE International Conference, Chengdu, China 24-27 Oct. 2011 ISBN: 9781424484423.
- [5] Lazarov, A.D., Kostadinov, T.P. "Synthetic Aperture Radar for Marine Target Imaging", Advanced Shipping and Ocean Engineering(ASOE), ISSN: 2306-7667, magazine, Dec. 2012, Iss. 1, pp. 8-13.
- [6] Lazarov, A.D., Kostadinov, T.P., Malamou, A. „Sar Signal Modeling and SLC Image Reconstruction" journal of Applied Magnetizm, Vol. 15 No.1, 2013, Greece, pp. 20 – 29.
- [7] Костадинов, Т. "Matlab реализация на BGISAR сигнали с код на Barker Модулация", Годишник на БСУ, сборник том 25 страници 78-86, ISSN: 1311-221-X, Бургас, България, 16 Ноември 2011.

Съдържание на дисертацията

Настоящият дисертационен труд се състои от увод, четири глави, научни приноси заключение и списък с цитирана литература. Съдържанието на труда е поместено на 172 страници, а изложението е придружено със 175 фигури и 1 таблица. Списъкът на цитираната литература включва 123 заглавия.

1. Оценка на съвременното състояние на проблема и обзор на съществуващата литература

В първа глава е направен обзор на съвременното състояние на системите със синтезирана апертура, тяхната топология, математически модели на сигналите и методи за реконструкция на изображението. Тя включва следните раздели.

- 1.1 Анализ на съвременното състояние на методи и алгоритми за SAR системи.
- 1.2 Анализ на съвременното състояние на методи и алгоритми за ISAR системи.
- 1.3 Анализ на съвременното състояние на методи и алгоритми за бистатични SAR (BISAR) системи

1.4. Изводи към първа глава

На база на направения литературен обзор може да се направят следните изводи.

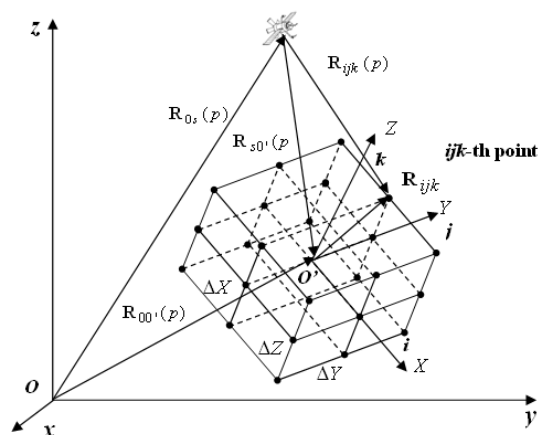
1. Разработени са топологии, сигналните модели, методи и алгоритми за извличане на изображенията и подобряване на тяхното качество със специални фокусиращи процедури за широк спектър от приложения на радиолокационните системи със синтезирана апертура: SAR, ISAR, BSAR, InSAR, BFSAR и т.н.

2. Независимо от това, актуални остават въпросите по аналитичното описание на специфичните геометрии на тези системи, въпросите, свързани с моделирането на широко-спектърни сигнали, осигуряващи висока разделителна способност по разстояние, проблемите по изграждане на фокусиращи алгоритми за подобряване на качеството а изображенията, както и програмната реализация на геометричните модели, сигналните модели и алгоритмите за възстановяване и фокусиране на изображенията. Оттук следват целта и задачите на дисертационния труд.

2. Аналитично описание на топологията на наблюдение на обекти чрез радиолокационни системи със синтезирана апертура SAR, ISAR, BSAR, InSAR, BFISAR

2.1. SAR топология

Анализира се SAR топология, при която обектът и системата на наблюдение са дефинирани в две отделни тримерни координатни системи. Космическа SAR система е разположена в координатна система на наблюдение $Oxyz$. Тя облъчва подвижна цел, представляваща обект върху земна или морска повърхност. Обектът е представен като съвкупност от точкови излъчватели, разположени във възлите на регулярна тримерна координатна решетка, описана в координатната система $O'XYZ$ (Фиг. 2.1).



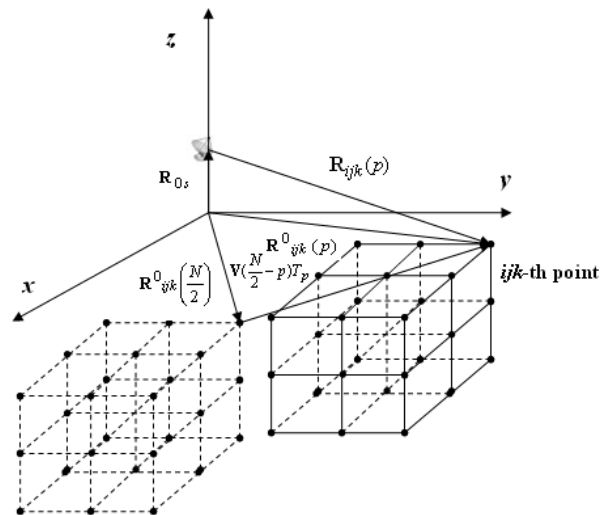
Фиг. 2.1 Топология на SAR случая

Топологията на SAR системата е описана на Фиг. 2.1 и се дефинира с векторите $\mathbf{R}_{0s}(p)$, $\mathbf{R}_{00'}(p)$, които са текущите позиционни вектори на сателитна SAR система и масовия център на обекта в момента p , описани в правоъгълна координатна система xyz . Векторите \mathbf{V} , $\mathbf{V}_{0'}$ са константни вектори – скорост на SAR система и обекта, като се предполага, че те са постоянни. Векторът \mathbf{R}_{ijk} е вектор, определящ положението на ijk -я точков излъчвател в областта на обекта.

2.3. ISAR топология

ISAR е топология, при която синтезът на апертурата се извършва чрез изменение на азимуталната позиция на наблюдавания обект относно неподвижна радиолокационна система на наблюдение. Разглежда се случай на разположение на

двете компоненти на топологията обектът и радиолокационната система в една тримерна координатна система $Oxyz$. Радиолокационната ISAR система е позиционирана на вектор – разстояние \mathbf{R}_{0s} от началото на координатна система $Oxyz$. Корабната цел е представена чрез в равномерна триизмерна координатна решетка. Координатите на възлите на решетката са дефинирани в същата координатна система, $Oxyz$. Целта е представена, като съвкупност от точкови излъчватели, разположени във възлите на тримерната решетка и се движи по праволинейна траектория с константен вектор-скорост \mathbf{V} (фиг.2.3).



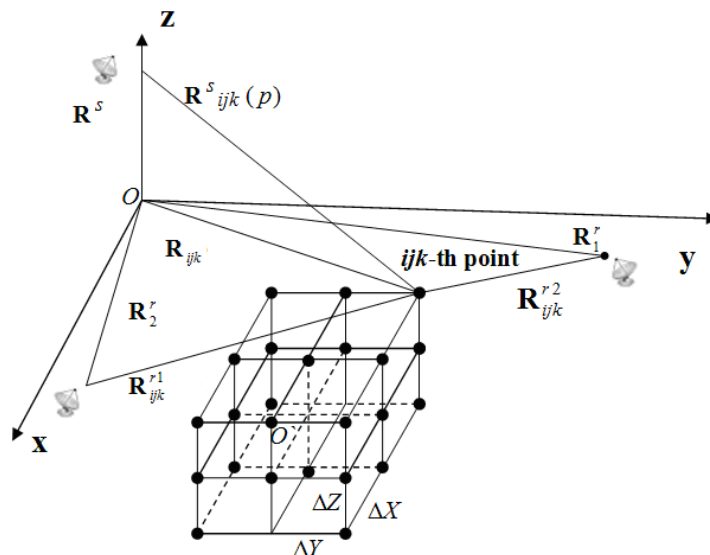
Фиг. 2.3. ISAR топология – системата за наблюдение и обектът са разположени в обща координатна система

Векторът – разстояние $\mathbf{R}_{ijk}(p) = [x_{ijk}(p), y_{ijk}(p), z_{ijk}(p)]^T$ измерен от ISAR системата, разположена на вектор разстояние $\mathbf{R}_{0s} = [x_{0s}, y_{0s}, z_{0s}]^T$ от началото на координатната система $Oxyz$, до ijk я точков излъчвател от повърхността на обекта в момента p , се определя от следното вектор-уравнение [65 – 68].

2.4. BSAR топология - предавател и два приемника, разположени в една координатна система

Анализира се тримерна (3D) BSAR топология, която включва следните структурни компоненти: предавател, разположен на космически апарат (сателит, космически кораб, космическа станция и т.н.), цел, обект, разположен върху земна или морска повърхност и два стационарни приемника, разположени върху земна повърхност. Топологията е представена на Фиг.2.4, където $\mathbf{R}^s(p)$ е текущият позиционен вектор на подвижния предавател в дискретен момент от време p , \mathbf{R}_1^r и \mathbf{R}_2^r - позиционни вектори на стационарните приемници дефинирани.

Предавателят, сателитно базиран заедно с двата приемника и обектът са разположени в една Декартова тримерна координатна система $Oxyz$. Целта се представя като съвкупност от точкови излъчватели, разположени в същата координатна система, в която са позиционирани предавателят и приемниците.



Фиг. 2.4. Примерен топологичен модел на BSAR сценария

Въвежда се означението $\mathbf{R}^s_{ijk}(p) = [x_{ijk}(p), y_{ijk}(p), z_{ijk}(p)]^T$ за дефиниране на вектор-разстоянието от сателитния предавател, с вектор-позиция $\mathbf{R}^s(p)$, до ijk -я точков излъчвател от пространството на обекта в момента p [55].

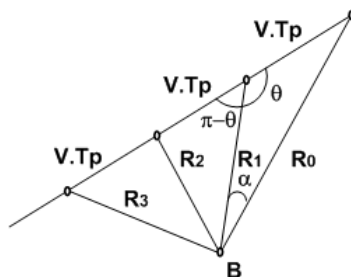
2.5. BISAR топология - предавателят и приемникът са пространствено разделени и разположени в една тримерна координатна система, а обектът на наблюдение в отделна тримерна координатна система

Разглежда се BISAR (Bistatic SAR) система с топология, изобразена в тримерна координатна система. Тази система включва: стационарни радио-предавател и радиоприемник, разположени върху земната повърхност в обща координатна система на наблюдение и обект, разположен на морската повърхност и изобразен в отделна координатна система. Бистатичният ъгъл предавател-цел-приемник е различен от 180° . BISAR пространствена конфигурация е илюстрирана на Фиг.2.5, където \mathbf{R}^s и \mathbf{R}^r са вектор – координати, описващи положението на приемната и предавателна станции в Декартовата координатна система $Oxyz$, $\mathbf{R}^s(p)$ и $\mathbf{R}_{00}(p)$ - вектор-позициите на предавателя и масовия център в дискретен момент от времето p . Обектът на наблюдение е морска цел. Той се представя като съвкупност от блестящи точки, разположение върху сложна геометрична структура и се дефинира в Декартова координатна система $OXYZ$. Пространствения вектор \mathbf{R}_{ijk} е вектор-позицията на ijk -я точков излъчвател. От геометричните съотношения на Фиг. 2.5 могат да се изведат следните аналитико-геометрични изрази [59, 60].

А. Геометрия на метода за определяне на кинематичните параметри на обекта при BFISAR топологии

Интерес представлява функционалната зависимост между линейната скорост и ъгъла между траекторията и линията на визиране на обекта.

Допуска се, че целта се движи праволинейно с постоянна скорост \mathbf{V} и по произволно ориентирана траектория. Във всеки момент p се определят разстоянията (2.32) $R_0, R_1, R_2, R_3 \dots$ от приемната точка В до точка от целта (Фиг.2.8).



Фиг. 2.8 Връзка между линейната скорост и ъгъла между траекторията и линията на видимост

Чрез прилагане на косинусовата теорема за два от прилежащите триъгълници на Фиг.2.8 се получават следните уравнения за изчисление на линейната скорост на целта и ъгъла между траекторията и линията на визиране на обекта

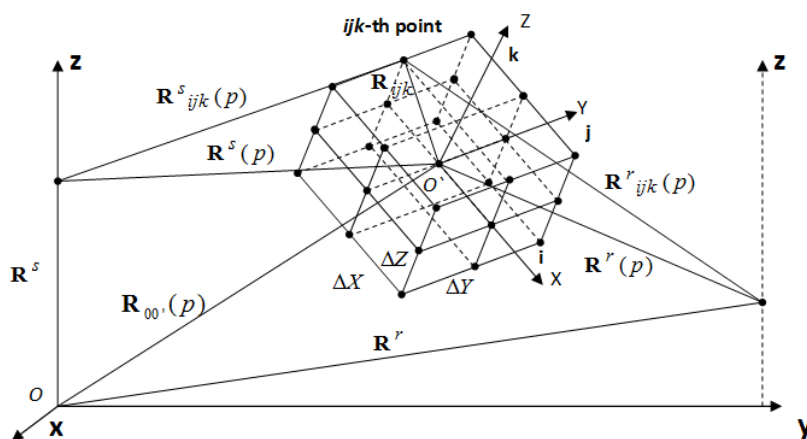
$$V = \frac{1}{T_p} \sqrt{\frac{R_0^2 + R_2^2 - 2R_1^2}{2}}; \quad (2.35)$$

$$\cos \theta = \frac{R_1^2 + (VT_p)^2 - R_0^2}{2R_1(VT_p)}. \quad (2.36)$$

Прибавяйки синусовата теорема могат да се пресметнат всички азимутални ъгли на точковата цел във всеки един момент p . Например ъгълът α в първия триъгълник се дефинира с

$$\arcsin \alpha = \frac{VT_p}{R_0} \sin \theta. \quad (2.37)$$

Изразите (2.35 – 2.37) се прилагат при изчисление на кинематичните параметри на целта при BFISAR топологии (Фиг.2.5.)



Фиг. 2.5. Топология на BFISAR

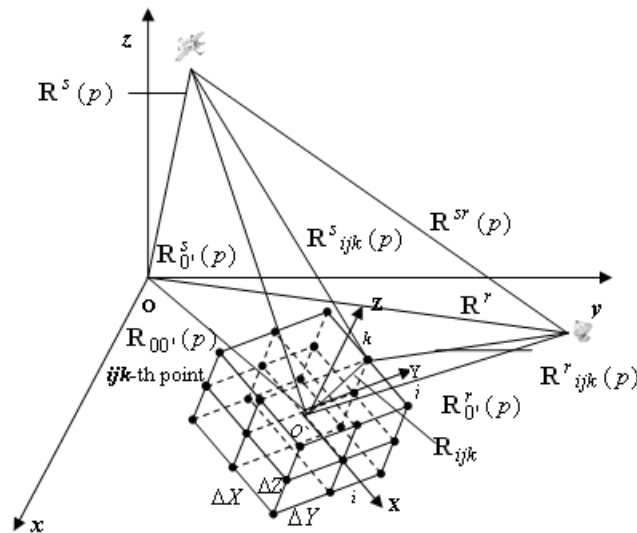
Пълно разстояние предавател- ijk -ти точков излъчвател-приемник се представя с израза

$$R_{ijk}(p) = \frac{|R^s_{ijk}(p)| + |R^r_{ijk}(p)|}{2} \quad (2.25)$$

2.7. BGISAR топология - подвижен предавател и стационарен приемник са пространствено разделени и разположени в една тримерна координатна система, а подвижен обект на наблюдение е разположен в отделна тримерна координатна система

BGISAR е обобщена топология със стационарен приемник, разположен върху или в близост до земната повърхност, предавател, разположен на подвижна космическа или въздушна платформа, изобразени в обща тримерна координатна система на наблюдение $Oxyz$ и подвижен обект, намиращ се върху земна, морска повърхност или във въздуха. Топологията от Фиг.2.9 се описва със следните векторни съотношения. Векторът $R^s(p)$ е векторът-позиция на приемника в дискретен момент p , вектор-координати $R_{00^i}(p)$ определя положението на масовия център на обекта, векторът R^r е стационарният вектор – позиция на приемника.

Целта се представя, като съвкупност от елементарни точкови отражатели в Декартова координатна система $OXYZ$, като R_{ijk} е векторът – позиция на ijk -я точков излъчвател.



Фиг. 2.9. Геометрия на BGISAR

От геометричните съотношения на Фиг.2.9 могат да се запишат следните векторни изрази, дефиниращи кинематиката на обекта [45].

2.8. Програмно осигуряване на алгоритъма за изчисляване на модула на векторното разстояние между компонентите на радиолокационната система и обекта при топологии на SAR, InSAR, ISAR, BSAR, BFISAR.

Програмното осигуряване на радиолокационни системи с инверсна синтезирана апертура за изобразяване е процес състоящ се от няколко етапа – дефиниране на параметрите на радиолокационните системи, дефиниране на желаната топология, изчисление на разстоянието предавател – обект – приемник и обратно пропорционалното на разстоянието време на закъснение до всяка една точка от повърхността на обекта записано във вид на масив, удобен за програмна реализация

2.9. Математическо описание на излъчените радиолокационни сигнали, използвани при апертурния синтез

А. Линеен честотно модулиран (ЛЧМ) сигнал

Приема се, че SAR предавателят генерира и облъчва обекта с последователност от ЛЧМ импулси, всеки от които се описва с израза

$$\dot{S}(t) = \text{rect} \frac{t}{T} \exp\{-j[\omega t + bt^2]\} \quad (2.41)$$

където $\omega = 2\pi \frac{c}{\lambda}$ е ъгловата честота; $c = 3.10^8$ m/s е скоростта на светлината; λ е дължината на вълната на сигнала; T е времевата продължителност на LFM импулс; $b = \frac{2\pi\Delta F}{T}$ е коефициентът на ЛЧМ.

Б. Сигнал, модулиран с код на Barker

Приема се, че SAR предавателят генерира и облъчва обекта с последователност от фазово-кодovo модулирани радио-импулси с код на Barker, всеки от които се описва с израза

$$S(p, t) = \sum_{p=0}^{N-1} a \cdot \text{rect} \frac{t}{T} \exp\{-j[\omega(t) + \pi b(t)]\} \quad (2.42)$$

където a е амплитудата на излъчения сигнал; $t = \tilde{t} \bmod T_p$ е бързото време, дефинирано с израза $t = \tilde{t} - pT_p$; p - индексът на излъчения импулс; T_p - периодът на повторение на импулса; $b(t)$ - времевата фазово-кодovo модулираща последователност; $\omega = 2\pi c / \lambda$ - ъгловата честота на сигнала.

Правоъгълната функция $\text{rect}(\cdot)$ дефинира финитния характер на Barker кодовата последователност и има вида

$$\text{rect} \frac{t}{T} = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq \frac{t}{T} \leq 1; \\ 0, & \text{otherways} \end{cases} \quad (2.43)$$

където

$$K = \frac{T}{\Delta T} = 13 \text{ - пълният брой сегменти в ИКМ сигнал;}$$

T - времевата продължителност на модулираната с фазов код на Barker последователност;

ΔT - времевата продължителност на един фазов сегмент.

В. Сигнал с кратковременни импулси

Свръх тесните времеви импулси, използвани в системите SAR осигуряват висока разделителна способност по разстояние, но се отличават с нисък енергиен потенциал. Това означава, че тези импулси могат да се използват в радиолокационните системи с

малък радиус на действие. Аналитичният израз на излъчения от предавателя монохроматичен радиоимпулс се описва с израза [9]

$$s(t) = A \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(j\omega t), \quad (2.44)$$

където правоъгълната функция описва финитния характер на сигнала и се записва във вида

Г. Сигнал с GPS C/A фазов код

Приемайки, че GPS (Global Positioning System) предавателя облъчва целта с последователност от фазово модулиран импулсен код от вида coarse acquisition - C/A GPS код. Всеки сигнал, модулиран с GPS C/A код се дефинира с израза [83]

$$S(t) = a \cdot \text{rect}\frac{t}{T} \exp\{-j[\omega t + \pi b(t) + \varphi_0]\} \quad (2.45)$$

където a е интензивността на импулсната последователност, $\omega = 2\pi c/\lambda$ е кръговата честота, φ_0 е началната фаза, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s е скоростта на светлината, $b(t)$ е бинарния параметър на C/A фазово кодово модулираща последователност от импулси.

Код G1, представен с полинома $1 + X^3 + X^{10}$ или със стойностите на коефициентите (състояние на регистрите), дефинирани с израза

$$G1(t) = \begin{cases} 0 & t = 1 \div 2, 4 \div 6, 10 \\ 1 & t = 3; 7 \div 9 \end{cases}, \quad (2.46)$$

където t е номерът на задържащ елемент на регистъра.

Код G2, представен с полином $1 + X^2 + X^3 + X^6 + X^8 + X^9 + X^{10}$ или със стойностите на коефициентите (състояние на регистрите), дефинирани с израза

$$G2(t) = \begin{cases} 0 & t = 1, 4 \div 5, 7 \\ 1 & t = 2 \div 3; 6; 8 \div 10 \end{cases} \quad (2.47)$$

Д. Сигнал с GPS P фазов код

Генераторните полиноми, за описване на GPS P кода имат вида [30, 93]

$$\begin{aligned} \text{P code X1A} & 1 + X^6 + X^8 + X^{11} + X^{12} \\ \text{P code X1B} & 1 + X^1 + X^2 + X^5 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11} + X^{12} \\ \text{P code X2A} & 1 + X^1 + X^3 + X^4 + X^5 + X^7 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11} + X^{12} \\ \text{P code X2B} & 1 + X^2 + X^3 + X^4 + X^8 + X^9 + X^{12} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Началните стойности на коефициентите на генераторните полиноми имат вида

$$\begin{aligned} \text{P code X1A} & 001001001000 \\ \text{P code X1B} & 010101010100 \\ \text{P code X2A} & 100100100101 \\ \text{P code X2B} & 010101010100 \end{aligned} \quad (2.50)$$

2.10. Изводи към втора глава

Направен е анализ на геометрията и кинематиката на различни конфигурации на радиолокационни системи, прилагачи принципа на апертурния синтез.

1. Изведени са аналитичните изрази, дефиниращи основните геометрични и кинематични характеристики на SAR, InSAR, ISAR, BSAR и BFISAR топологии, описани в различни координатни системи, както следва:

- SAR топология - обектът и системата на наблюдение са дефинирани в две отделни координатни тримерни системи.
- SAR интерферометрична топология - обектът и системата на наблюдение са разположени в една тримерна координатна система.
- ISAR топология - системата на наблюдение и обектът са разположени в една тримерна координатна система.

- BSAR топология - предавател и два приемника, разположени в една координатна система.
 - BISAR топология - предавателят и приемникът са пространствено разделени и разположени в една тримерна координатна система, а обектът на наблюдение в отделна тримерна координатна система
 - BFISAR топология - предавателят и приемникът са пространствено разделени и разположени в една тримерна координатна система, а обектът на наблюдение в отделна тримерна координатна система.
 - BGISAR топология - подвижен предавател и стационарен приемник са пространствено разделени и разположени в една тримерна координатна система, а подвижен обект на наблюдение е разположен в отделна тримерна координатна система.
2. Решена е геометричната задача на метода за определяне на кинематичните параметри на обекта при BFISAR топологии.
3. Разработени са програмите, реализиращи алгоритъма за изчисляване на модула на векторното разстояние между компонентите на радиолокационната система и обекта при топологии на SAR, InSAR, ISAR, BSAR, BFISAR.

3. МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА РАДИОЛОКАЦИОННИТЕ СИГНАЛИ, ОТРАЗЕНИ ОТ ОБЕКТИ СЪС СЛОЖНА КОНФИГУРАЦИЯ И ПРОГРАМНО ОСИГУРЯВАНЕ НА ПРОЦЕСА НА ФОРМИРАНЕ НА СИГНАЛИТЕ. ИЗЧИСЛИТЕЛНИ ПРОЦЕДУРИ ЗА ВЪЗСТАНОВЯВАНЕ НА ИЗОБРАЖЕНИЕТО НА ОБЕКТИТЕ ПРИ АПЕРТУРНИЯ СИНТЕЗ

3.1. Математическо описание на радиолокационните сигнали, отразени от обекти със сложна конфигурация

А. SAR модел на ЛЧМ сигнал, отразен от сложен релеф

Детерминираната компонента на SAR сигнала, отразен от $z(ij)$ я точков излъчвател от сложна повърхност има следната форма [61 - 63]

$$\dot{S}_{ij}(p, t) = a_{z(ij)} \text{rect} \frac{t - t_{ij}(p)}{T} \exp \left\{ -j \left[\omega(t - t_{ij}(p)) + b(t - t_{ij}(p))^2 \right] \right\} \quad (3.1)$$

където

$$\text{rect} \frac{t - t_{ij}(p)}{T} = \begin{cases} 1, & 0 \leq \frac{t - t_{ij}(p)}{T} < 1, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

представлява правоъгълната функция, чиито аргумент зависи от стойността на текущото време и стойността на времето за закъснение от отделния елементарен отражател и показва, че отразеният сигнал е ограничена във времето функция. Правоъгълната функция определя реда на кохерентното сумиране на сигналите, отразени от отделните блестящи точки и участва в определяне на компонентите на сигнала отразени от всички $z(ij)$ -блестящи точки.

Б. BSAR модел на сигнал от кратковременни импулси, отразен от сложна геометрична повърхност

Сигналът, отразен от произволен точков излъчвател може да бъде представен с израза [55]

$$\dot{s}(p, t) = a_{ijk} \operatorname{rect} \frac{t - t_{ijk}(p)}{T} \exp \{j\omega[t - t_{ijk}(p)]\}, \quad (3.5)$$

където

$$\operatorname{rect} \frac{t - t_{ijk}(p)}{T} = \begin{cases} 1, & 0 \leq \frac{t - t_{ijk}(p)}{T} < 1, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$t_{ijk}(p) = \frac{R_{ijk}(p)}{c}$ е пълното време закъснение на сигнала, получено по трасето предавател-обект-приемник, a_{ijk} означава амплитудата на тримерната дискретна функция на изображението, $\tilde{t} = t \bmod T_p$ - бавното време, p отбелязва броя на излъчените импулси, T_p - периодът на повторение на импулса, $t = \tilde{t} - pT_p$ - бързото време, представено като $t = k.T$, където k - номерът на разделителния елемент по разстояние, в които се намира ISAR сигнала.

В. ISAR модел на ЛЧМ сигнал, отразен от обект със сложна геометрична форма

Геометричната сума от ISAR сигналите, отразени от точковите излъчватели на целта, облъчена с ЛЧМ импулси, се представя със следния израз [50], [55-58]

$$\dot{S}_{ijk}(p, t) = a_{ijk} \operatorname{rect} \frac{t - t_{ijk}(p)}{T} \exp \left\{ -j \left[\omega(t - t_{ijk}(p)) + b(t - t_{ijk}(p))^2 \right] \right\} \quad (3.7)$$

където

$$\operatorname{rect} \frac{t - t_{ijk}(p)}{T} = \begin{cases} 1, & 0 \leq \frac{t - t_{ijk}(p)}{T} < 1, \\ 0, & \frac{t - t_{ijk}(p)}{T} < 0 \\ 0, & \frac{t - t_{ijk}(p)}{T} \geq 1 \end{cases}$$

Г. BGSAR модел на сигнал с фазов код на Barker, отразен от обект със сложна геометрична форма

След прилагане на принципа на геометричното сумиране на отразените сигнали от всички точкови излъчватели от обекта за всеки импулс с номер p , детерминираната компонента на сумарния BGSAR сигнал се получава във вида

$$S(p, t) = \sum_{ijk} \operatorname{rect} \frac{t - t_{ijk}(p)}{T} \exp \left\{ -j \left[\omega(t - t_{ijk}(p)) + \pi b(t) \right] \right\}, \quad (3.26)$$

където

$$\text{rect} \frac{t-t_{ijk}(p)}{T} = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 \leq \frac{t-t_{ijk}(p)}{T} < 1; \\ 0, & \text{if } \frac{t-t_{ijk}(p)}{T} < 0 \text{ and } \frac{t-t_{ijk}(p)}{T} \geq 1; \end{cases}$$

3.2. Програмно осигуряване на процеса на получаване на комплексен сигнал отразен от обект със сложна геометрия при SAR, ISAR, BSAR, InSAR, BFSAR топологии.

Програмното осигуряване на радиолокационни системи с инверсна синтезирана апертура за изобразяване е процес, състоящ се от няколко етапа – дефиниране на параметрите на радиолокационните системи, дефиниране на желаната топология, изчисление на разстоянието предавател – обект – приемник и право пропорционалното на разстоянието време на закъснение до всяка една точка от повърхността на обекта, записано във вид на масив, удобен за програмна реализация [2], дефиниране на линейно честотно модулиран ЛЧМ сигнал и времето на закъснение от всеки точков излъчвател, сумиране на отразените ЛЧМ сигнали, за да се получи комплексният сигнал.

3.3. Изчислителни процедури за възстановяване на изображението на обектите при апертурния синтез

За обработка на сигналите и реконструкция на изображенията се прилагат непараметрични и параметрични методи. В дисертационния труд се използват непараметрични методи, към които могат да се отнесат спектралните и корелационни методи за обработка на сигналите. Реконструкцията на изображението от комплексния отразен сигнал със спектрални изчислителни методи се извършва чрез прилагане на компресиращи техники, реализирани с инверсно Фурие преобразуване по двете координати, по разстояние и напречно разстояние (азимут). Реконструкцията на изображение от комплексния отразен сигнал, модулиран с фазов код, се постига чрез корелационна компресираща процедура по разстояние и спектрална Fourier компресираща процедура по азимут. В случай, че изображението е с неудовлетворително качество, се прилага фокусираща процедура от висок ред, наречена процедура по компенсация на движението от висок ред.

3.4. Построяване на алгоритъм за възстановяване на BFISAR изображение от сигнал, формиран като последователност от кратковременни импулси

За всеки k -ти разделителен елемент по разстояние функцията на изображението \hat{a}_{ijk} може да се изчисли посредством израза.

$$\hat{a}_{ijk}(\hat{p}, k) = \sum_{p=1}^N [s(p, k) \exp(j\Phi(p))] \exp\left(j2\pi \frac{p\hat{p}}{N}\right) \quad (3.58)$$

където p е броят на излъчените импулси, N е пълният брой на излъчени импулси по време на синтеза на апертурата, откъдето следва алгоритъмът за реконструкция на изображението:

Стъпка 1. Компенсиране на фазите, индуцирани от радиално движение от висок ред, чрез умножение на $s(p, k)$ с експоненциалният множител $\exp[j\Phi(p)]$,

$$\hat{s}(p, k) = s(p, k) \exp[j\Phi(p)] \quad (3.59)$$

Стъпка 2 Извличане на комплексното изображение чрез компенсиране на фазите, индуцирани от радиално движение от първи ред на блестящите точки в k -та разделителна клетка чрез прилагане на обратно Фурие преобразуване т.е.

$$\hat{a}_{ijk}(\hat{p}, k) = \sum_{p=1}^N \hat{s}(p, k) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{p\hat{p}}{N}\right) \quad (3.60)$$

Следователно, комплексното изображение се получава чрез обратно бързо преобразуване на Фурие (IFFT) върху комплексния сигнал.

Метод за определяне на кинематичните параметри на целта при BFISAR топологии

При BFISAR топология интерес представлява проблемът по определяне на кинематичните параметри на наблюдавания обект. За целта се прилага моделът на точкова цел или доминиращ точков излъчвател от целта.

В този случай сигналът, отразен от целта може да се запише във вида $\dot{s}(p, k) = \dot{s}(p)$. Амплитудата и фазата на сигнала, отразен от целта се определят с изразите:

$$|\dot{s}(p)| = \sqrt{[\text{Re}(\dot{s})]^2 + [\text{Im}(\dot{s})]^2}; \quad (3.61)$$

$$\Phi(p) = \arctg \frac{\text{Im}(\dot{s})}{\text{Re}(\dot{s})}, \quad (3.62)$$

където $\text{Re}(\dot{s})$ и $\text{Im}(\dot{s})$ са респективно реалната и имагинерна част на комплексния сигнал. Инструменталната фаза на сигнала се изменя в интервала от $(-\pi/2)$ до $(\pi/2)$. За да се пресметне моментното разстояние до точковата цел, е необходимо да се намери числената стойност на разтеглената фаза. След процедурата по разтегляне на фазата, дискретното моментно разстояние между целта и точката на приемане може да се представи с израза :

$$R_p = \frac{\lambda}{2\pi} \hat{\Phi}(p), \quad (3.63)$$

където p е конкретният момент на измерване; $\hat{\Phi}(p)$ е свитата моментна фаза.

При известно моментно разстояние R_p , параметрите на целта – линейна скорост V и азимуталните ъгли α могат да бъдат изчислени чрез прилагане на изразите (2.35 -2.37).

3.5. Построяване на алгоритъм за възстановяване на SAR изображения чрез прилагане на спектрални методи за компресия на комплексния сигнал

А. Алгоритъм за реконструкция на двумерна функция на InSAR (peaks) изображение от комплексен интерферометричен сигнал

Реконструкция на изображението се извършва в съответствие с израза

$$a_{ijk}(\hat{p}, \hat{k}) = \sum_{p=1}^N \left[\sum_{k=1}^K \hat{S}(p, k) \cdot \exp[j\Phi(k, p)] \exp\left(j2\pi \frac{k\hat{k}}{K}\right) \right] \exp\left(j2\pi \frac{p\hat{p}}{N}\right) \quad (3.67)$$

Основни операции

Фазова корекция: $\tilde{S}(p, k) = \hat{S}(p, k) \cdot \exp[j\Phi(p, k)]$ с итеративно дефинирани коефициенти a_m и b_m в (3.66) чрез ентропийна оценъчна функция на изображението.

Компресия по разстояние: $\tilde{S}(p, \hat{k}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \tilde{S}(p, k) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{k\hat{k}}{K}\right)$ - дискретно инверсно

преобразуване на Фурие.

Компресия по азимут:

$a_{ijk}(\hat{p}, \hat{k}) = \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \tilde{S}(p, \hat{k}) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{p\hat{p}}{N}\right)$ - дискретно инверсно преобразуване на Фурие за

извличане на комплексното изображение.

Двете Фурие преобразувания могат да се реализирани чрез стандартно бързо преобразуване на Фурие.

Получаване на крайното изображение на целта, което се постига чрез намиране на модула на комплексното изображение:

$$|a_{ijk}(\hat{p}, \hat{k})| = \left| \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \tilde{S}(p, \hat{k}) \cdot \exp\left(j2\pi \frac{p\hat{p}}{N}\right) \right| \quad (3.68)$$

Б. Синтез на алгоритъм за фазова корекция на комплексния сигнал, отразен от цел със сложна геометрия чрез минимизация на ентропията на изображението на обекта

В случай, $\Phi(p, k) = 0$, изображението на обекта може да се получи чрез прилагане на следните операции: компресия по разстояние, компресия по азимут и намиране на модула на изображението. Ако изображението получено чрез процедура (3.67) е замъглено, е необходимо да се приложи фазова корекция на $\hat{S}(p, k)$ [1]. Това означава, че матрицата $\hat{S}(p, k)$ трябва да се умножи с израза $\exp[j\Phi(p, k)]$, т.е. $\tilde{S}(p, k) = \hat{S}(p, k) \cdot \exp[j\Phi(p, k)]$. Процедурата изисква определяне на $\Phi(p, k)$ чрез коефициентите $a_2 \dots a_m, b_2 \dots b_m$ на полинома (3.67).

В случай, че $\Phi(p, k) \neq 0$, фазовата корекция се извършва итеративно с използването на оценъчна функция. Като оценъчна функция се използва ентропийната функция. С нея се пресмята качеството на изображението. Изчислителната процедура може да бъде редуцирана в случай, че $\Phi(p, k) = \Phi(p)$ за всяко k , т.е. полиномната функция е ограничена до

$$\Phi(p) = a_2 \cdot (pT_p)^2 + \dots + a_m (pT_p)^m \quad (3.69)$$

където коефициентите a_m се пресмятат на няколко етапа. В първия етап е изчислен коефициентът a_2 , във втория - a_3 и т.н. Точната стойност на коефициента a_m се изчислява итеративно, започвайки от $a_m = 0$ и увеличавайки със стъпка $\Delta a_m = 0.01$ ако качеството на изображението се подобри. Ако качеството на изображението не се подобри, или се влоши се преминава към изчисляване на следващия коефициент a_{m+1} или се прекратява процедурата. На практика коефициентът a_2 оказва най-голямо влияние върху процеса на фазова корекция.

В. Синтез на алгоритъм за фазова корекция на комплексния сигнал, отразен от цел със сложна геометрия чрез минимизация на ентропията на изображението на обекта

Нека $\Phi_s(p)$ бъде фазово коригиращата функция, дефинирана на стъпка s . тогава фазовата корекция се постига от

$$\tilde{S}_s(p, k) = \hat{S}(p, k) \exp(-j\Phi_s(p)). \quad (3.70)$$

След текущата фазова корекция и извличане на изображението чрез компресия по разстояние и азимут, се дефинира квадрата на нормализираното изображение като

$$I_s(\hat{p}, \hat{k}) = \frac{|a_{ijk,s}(\hat{p}, \hat{k})|^2}{\sum_{p=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-1} |a_{ijk,s}(\hat{p}, \hat{k})|^2}. \quad (3.71)$$

Дефиниращо като оценъчна функция на изображението ентропията на нормираното SAR изображение

$$H_s = - \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-1} I_s(\hat{p}, \hat{k}) \ln[I_s(\hat{p}, \hat{k})]. \quad (3.72)$$

Процедурата се повтаря, докато не се намери глобален минимум на стойността на ентропията H_s . Оценката на фазово коригиращата функция отговаря на минимума на оценяващата качеството на изображението ентропийна функция, т.е.

$$\Phi(p) = \arg \min_{\Phi} \{H[I_s(\hat{p}, \hat{k})]\} \quad (3.73)$$

Оптималните стойности на коефициентите $(a_m, b_m)_{\text{opt}}$ от фазово коригиращата функция отговарят на минималната стойност на ентропийната функция на оценяваното изображение т.е.

$$(a_m, b_m)_{\text{opt}} = \arg \min_{a_m, b_m} \{H[I_s(\hat{p}, \hat{k})]\} \quad (3.74)$$

3.6. Построяване на алгоритъм за възстановяване на SAR изображения чрез прилагане на спектрално-корелационен метод за компресия а сигнала с фазово-кодова модулация

Аналитичният израз, чрез който се определя функцията на изображението, получена от комплексен сигнал, модулиран с код на Barker има вида

$$a_{ijk}(\hat{p}, \hat{k}) = \sum_{p=1, N} \left\{ \sum_{k=\hat{k}}^{\hat{k}+K-1} [\hat{S}(p, k) \cdot \exp(j\Phi(p))] \exp[j\pi b((k - \hat{k} + 1)\Delta T)] \right\} \exp\left\{j \left[\frac{2\pi}{N} \hat{p} p \right] \right\}. \quad (3.76)$$

Оттук, възстановяването а изображението се реализира със следните операции:

1. Операция подравняване по разстояние. Състои се състои в корекция на отразените сигнали от всички елементарни излъчватели, така, че да бъдат разположени в едни и същи , т.е. постоянни разделителни елементи по разстояние при синтеза на апертурата Подравняване по разстояние в задачите по възстановяване се чрез преномериране на

разделителните клетки по разстояние например $k = \overline{1, K+L}$, където се регистрират дискрети от отразения комплексен сигнал за всеки излъчен импулс.

2. Фазова корекция (фокусировка) за компенсация а радиалното движение от висок ред

$$\tilde{S}(p, k) = \hat{S}(p, k) \cdot \exp(j\Phi(p)) \quad (3.77)$$

3. Крос-корелация на приетия сигнал с излъчен сигнал, модулиран с код на Barker (компресия по разстояние)

$$\tilde{S}(\hat{p}, \hat{k}) = \sum_{k=\hat{k}}^{\hat{k}+K-1} \tilde{S}(p, k) \exp[j\pi b((k - \hat{k} + 1)\Delta T)] \quad (3.78)$$

3. Азимутална компресия чрез инверсна Фурие трансформация (извличане на комплексно изображение)

$$a_{ijk}(\hat{p}, \hat{k}) = \sum_{p=1, N} \tilde{S}(p, \hat{k}) \exp\left\{j\left[\frac{2\pi}{N} \hat{p}p\right]\right\}. \quad (3.79)$$

Оценката на фазово коригиращата функция се постига чрез определяне на полиномните коефициенти с прилагане на итеративна процедура с минимизиране на ентропията на изображението. Процедурата е разгледана в предходния параграф.

3.7. Изводи към четвърта глава

Разработени са алгоритми за възстановяване (реконструкция) на изображенията от комплексни сигнали, получени при различни топологии на апертурния синтез. Разработените алгоритми могат да бъдат приложени при следните изчислителни операции:

1. Възстановяване на BFISAR изображение от сигнал, формиран като последователност от кратковременни импулси.

2. Възстановяване на SAR изображения чрез прилагане на спектрални методи за компресия на комплексния сигнал, като възстановяване на двумерна функция на InSAR (peaks) изображение от комплексен интерферометричен сигнал, двумерна функция на SAR изображение, ISAR изображение, BSAR и BFISAR изображения

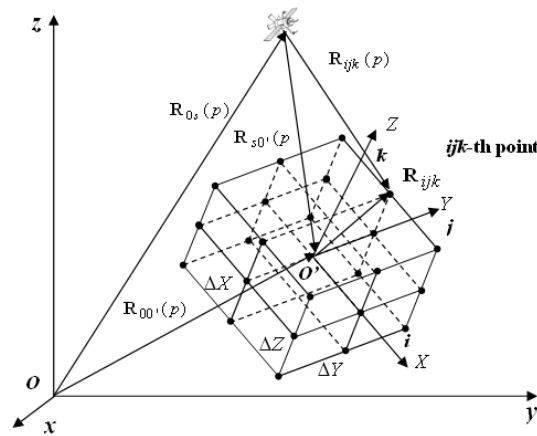
3. Възстановяване на SAR изображения чрез прилагане на спектрално-корелационен метод за компресия на сигнала с фазово-кодова модулация.

4. Предложен е метод за фазова корекция на комплексния сигнал, отразен от цел със сложна геометрия чрез минимизация на ентропията на изображението на обекта който може да се използва както при двумерната спектрална компресия (по разстояние и азимут), така и при корелационно-спектралната компресия по разстояние и азимут.

4. Числено моделиране на процеса на получаване на комплексни сигнали при апертурния синтез и възстановяване на изображенията

В настоящата глава се привеждат резултати от численото моделиране на процеса на получаване на комплексни сигнали при апертурния синтез, реализиран с множество топологии, геометрии и кинематики на компонентите на системите със синтезирана апертура. Целта на числените експерименти е да се докаже коректността на предложените геометрии, сигнални модели и възстановителни изчислителни процедури. Привеждат се резултати от числените експерименти, проведени при топологии на апертурния синтез, анализирани в дисертационния труд.

4.1. Числено моделиране на процеса на формиране комплексни сигнали и реконструкция на комплексни SAR интерферограми на сложна повърхност

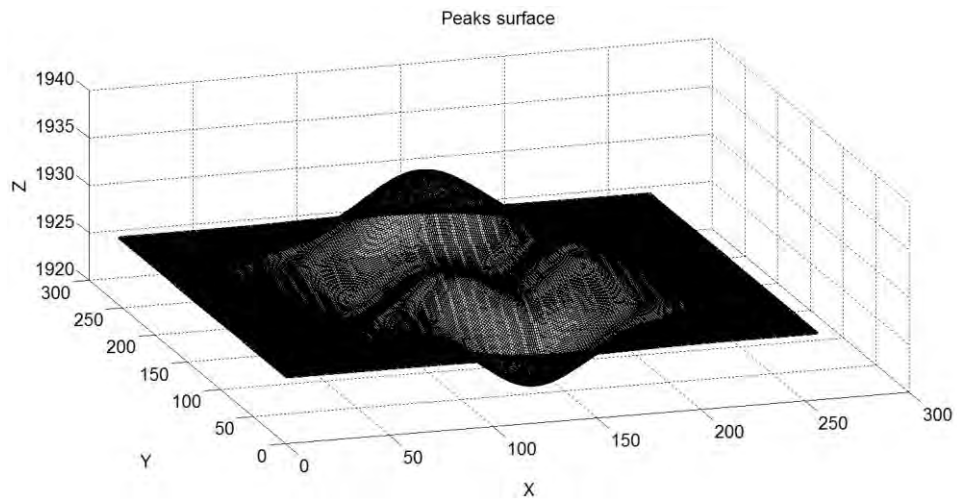


Фиг. 4.1. Топология на SAR

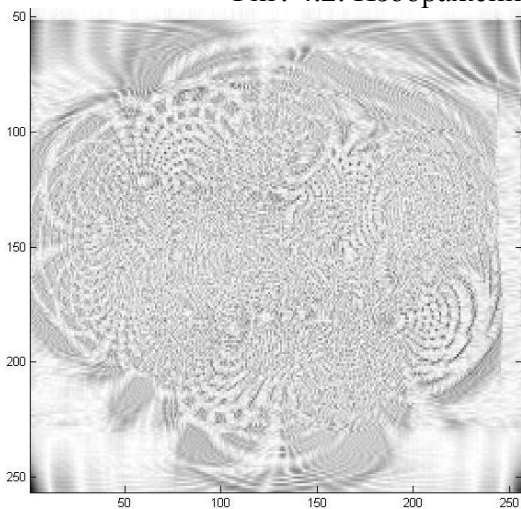
Разглежда се топология, при която системата на наблюдение, включва два приемо-предавателя, поставени на две отделни космически платформи, движещи се независимо един от друг по близки траектории [64]. На Фиг. 4.1 е представена геометрията на една SAR система. Геометрията на втората SAR система е аналогична. Изчисляването на модулите на векторите-разстояние се извършва с израз (2.4). Моделът на сигнала се реализира с израз (3.3). Изображенията се извличат чрез процедурите за реконструкция с изразите (3.55, 3.56, 3.60).

Приема се, че двата сателита от топологията на SAR, наблюдават район, чиито релеф има сложна геометрична форма, описана с функцията в Matlab “peaks” (Фиг.4.2). Сателитните станции се движат праволинейно в Декартова координатна система на наблюдение $Oxyz$, а геометрията на целта е описана в координатната система $O'XYZ$. Координатите на първия SAR сателит в момента на изобразяване са $p = N/2$: $x^s = -5 \cdot 10^4$ m; $y^s = -7,5 \cdot 10^3$ m; $z^s = 3 \cdot 10^5$ m; Координатите на втория SAR сателит в момента на изобразяване са $p = N/2$: $x^s = -5,04 \cdot 10^4$ m; $y^s = -8 \cdot 10^3$ m; $z^s = 3 \cdot 10^5$ m. Скоростта на движение на двата сателита е 2000 m/s. Насочващите ъгли са: $\alpha = \pi/2$, $\beta = 0$, $\gamma = \pi/2$. Параметрите на ЛЧМ SAR импулси са: период на повторение на импулса $T_p = 0.08$ s, ширина на ЛЧМ импулс $T = 10^{-6}$ s, брой на ЛЧМ отчети на предадения сигнал $K = 256$, носеща честота $f = 10^{10}$ Hz. Период на приемане на ЛЧМ импулси $\Delta T = T/K = 0.39 \cdot 10^{-8}$ s, ширина на честотната лента на ЛЧМ сигнал $\Delta F = 10^8$ Hz, брой на излъчените импулси $N = 256$. Наблюдаваната повърхност е моделирана чрез функцията на програмния език Matlab “peaks”, дефинирана в координатната система на наблюдение. Броят на възлите в координатната система в посоки Ox и Oy е 256 с разстояние между всеки възел $\Delta X = \Delta Y = 5$ m. Интензивностите на точковите излъчватели са от порядъка $a_{ij} = 0.01$.

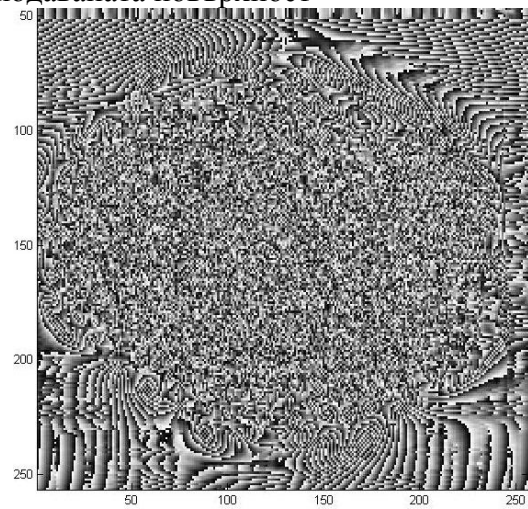
Комплексните изображения, получени от SAR сателитните системи са демонстрирани на Фигури 4.3 – 4.7. На Фиг.4.3 и Фиг.4.4 са показани амплитудните и фазови изображения на повърхността, получени от първата сателитна SAR станция.



Фиг. 4.2. Изображение на наблюдаваната повърхност

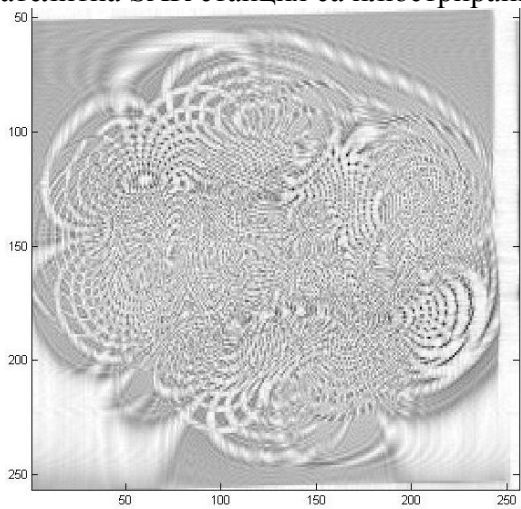


Фиг. 4.3. Амплитудно изображение на повърхността, получено от първия сателит

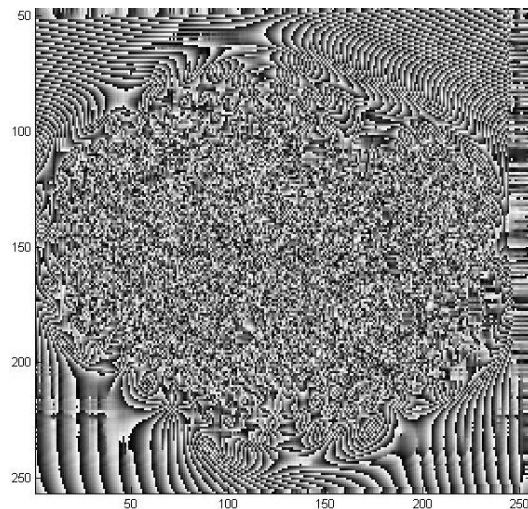


Фиг. 4.4. Единично фазово изображение на повърхността, получено от първия сателит

На Фиг.4.5 и Фиг.4.6 амплитудата и фазата на изображението, получено от втората сателитна SAR станция са илюстрирани.

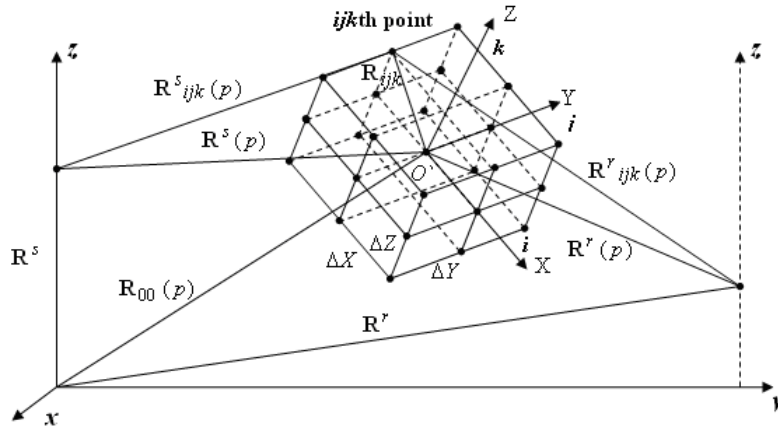


Фиг. 4.5. Единично амплитудно изображение на повърхността, получено от втория сателит



Фиг. 4.6. Фазово изображение на повърхността, получено от втория сателит

4.3. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни BFISAR сигнали от кратковременни импулси и възстановяване на изображението на морска цел

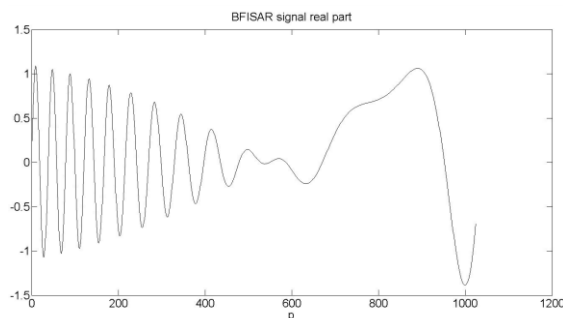


Фиг. 4.33. Топология на BFISAR

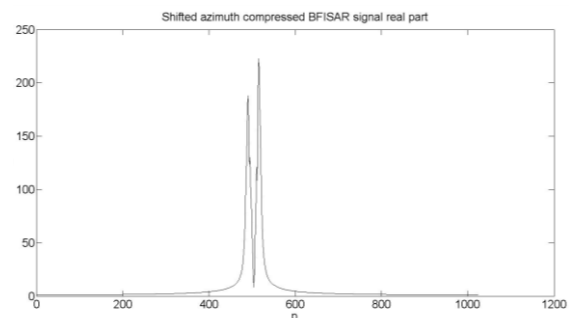
Модулът вектор-разстояние от Фиг.4.33 се описва с израза (2.31). Топологията на BFISAR [61], разгледана на Фиг.4.33, включваща морска цел извършваща праволинейно движение и стационарни приемна и предавателна станции разположени на земната повърхност. За цел се приема средна по големина лодка, преминаваща между предавателя и приемника, моделирана в експеримента като съвкупност от точкови излъчватели. Детерминистичната компонента на сигнала (3.6) и процедурите по възстановяване (3.51) са илюстрирани чрез числените резултати :

Допуска се, че лодка с дължина 8 m и скорост $V_x = -7$ m/s преминава базовата линия между предавателя с координати $x^s = 0$ m, $y^s = 0$ m, $z^s = 5$ m и приемника с координати $x^r = 0$ m, $y^r = 100$ m, $z^r = 5$ m. координатите на масовия център на лодката са $x_{00} = 0$ m, $y_{00} = 50$ m, $z_{00} = 0.5$ m. параметрите на радиолокационната станция са: носеща честота 10^{10} Hz, период на повторение на импулса $0.5 \cdot 10^{-3}$, широчина на импулса 10^{-6} s. целта е съставена от 8 точкови излъчвателя равномерно разпределени по повърхността на обекта.

Реалната част на BFISAR сигнала и изображението на целта са илюстрирани респективно на Фиг.4.34 и Фиг.4.35.



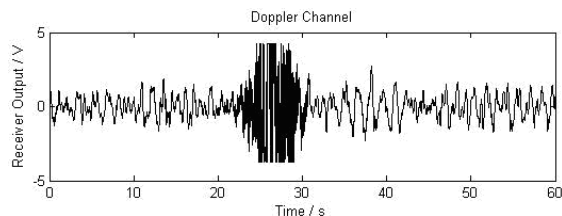
Фиг. 4.34. Реална част на BFISAR сигнала



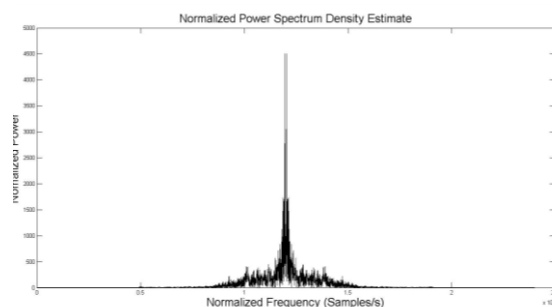
Фиг. 4.35. Изображение на целта на BFISAR система

Проведен е експеримент от екипа в Бърмингамския университет, в който средна по големина яхта преминава базовата линия предавател – приемник. Параметрите на измерващите уреди са близки до тези от описания теоретичен модел.

Амплитудния сигнал на изхода на канала на Доплеровия радар е представен на Фиг.4.36.



Фиг. 4.36. Експериментално измерени данни – изходен сигнал на Доплеровия канал



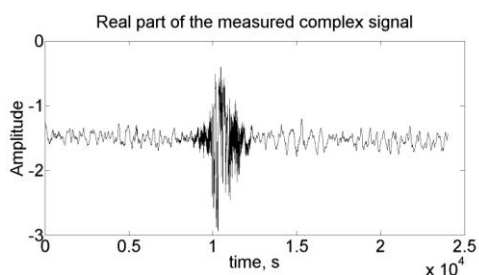
Фиг. 4.37. Изображение на BFISAR система, получено чрез БПФ и честотно отместване

Възстановяването на едномерното изображение, въз основа на измерваните импулси с широчина на честотната лента еквивалентна на 0.1 GHz се извършва с помощта на стандартна процедура на бързо преобразуване на Фурие в програмна среда Matlab. Демонстрация на резултатите е направена на Фиг.4.36. На Фиг.4.37 е описано честотно отмествено BFISAR изображение.

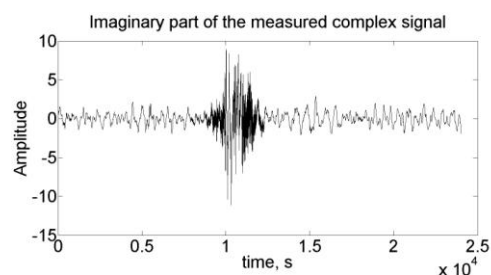
Лодката преминава главната зона на нееднозначност, която се характеризира с липса на разделителна способност по разстояние и малък Доплеров градиент, което означава ниска разделителност по азимут. Именно това е причината яхтата да бъде описана, като цел притежаваща само два доминиращи излъчвателя, които не могат да се видят ясно на Фиг.4.37.

Направеното сравнение между BFISAR изображенията на Фигури 4.35 и 4.37 илюстрира задоволително съвпадение. Единствената разлика е ясно изразените два доминиращи излъчвателя показани на Фиг.4.35, получена от числения модел.

За да се определи скоростта на движение на обекта се определят реалната и имагинерна компонента на регистрирания сигнал посредством трансформатор на Хилберт (Фиг.4.38, Фиг.4.39).

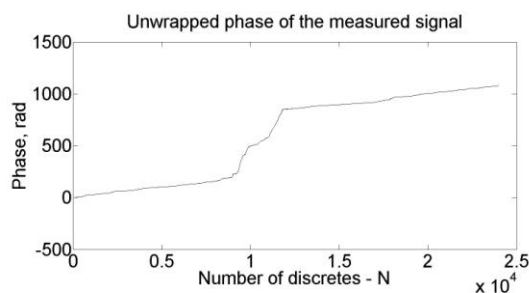


Фиг. 4.38. Експериментално измерени данни – реална част на изходния сигнал в Доплеровия канал от Хилберт преобразувател



Фиг. 4.39. Експериментално измерени данни – имагинерна част на изходния сигнал в Доплеровия канал от Хилберт преобразувател

Определя се фазата на сигнала. Следва да се отбележи, че инструменталната фаза е с граници на изменение от 0 до 2π . Тя се разтегля до стойности, кратни на 2π (Фиг.4.40).



Фиг. 4.40. Експериментално измерени данни – разтеглена фаза на сигнала

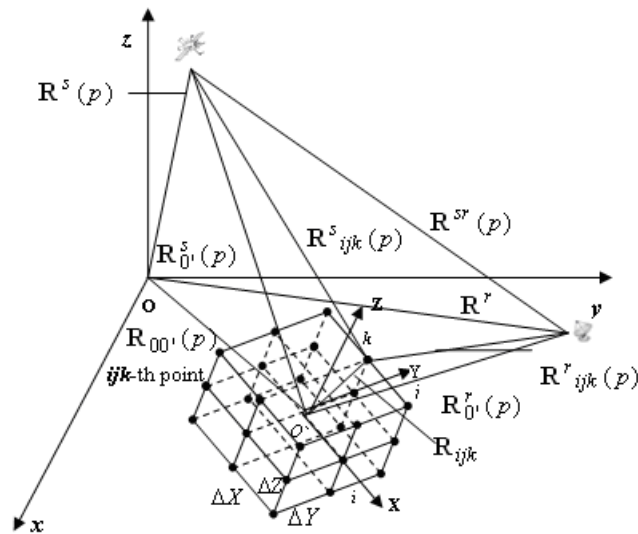
След изчисления на разстоянията до позициите на обекта се прилагат изрази (2.35, 2.36) за изчисление на скоростта на движещия се морски обект. Чрез заместване на стойностите на разтеглената фаза при изчисление на модула на вектор-разстояние до точка от обекта в три последователни момента от време p , се получават числените стойности на скоростта на обекта. Тези стойности са илюстрирани в таблица 4.1

R1, m	0.0298	0.0353	0.0408	0.0462	0.0517	0.0571	0.1960	2.3902	3.6327
R2, m	0.0353	0.0408	0.0462	0.0517	0.0571	0.626	0.1902	2.4017	3.6461
R3, m	0.0408	0.0462	0.0517	0.0571	0.626	0.068	0.1844	2.4132	3.6595
V, m/s	7.7785	7.7373	7.6959	7.6545	7.613	7.5714	7.7935	19.046	22.52
Phase №	1	2	3	4	5	6	600	900	1000

Табл. 4.1.

В частта от фазовата крива, съответстваща на полезния, отразен от целта сигнал, стойностите на разтеглените фази много точно определят скоростта на обекта. В момента, когато обектът пресича базовата линия (средата на кривата) изчислената скорост е много малка 1 m/s, а с приближаване към края на фазовата крива, в областта, извън полезния сигнал се наблюдава отклонения от действителната скорост на обекта 7 m/s.

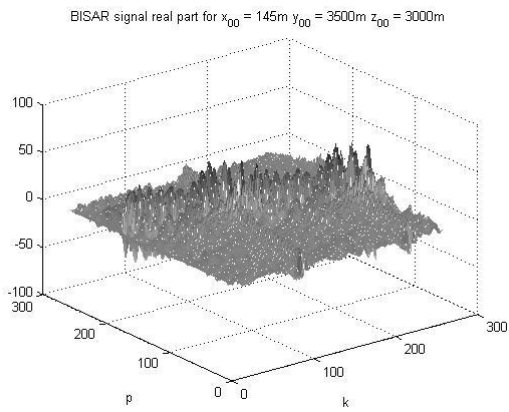
4.6. Числено моделиране на процеса на получаване на BGISAR комплексен сигнал и реконструкция на изображението



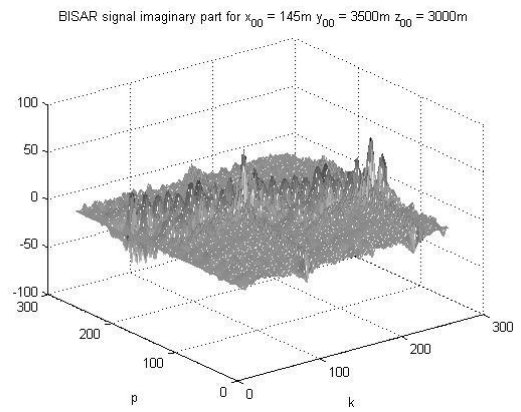
Фиг. 4.79. Топология на BGISAR

Доказателство за коректността на BGISAR топология, геометрия и кинематични характеристики, модели на сигнали, алгоритмите за възстановяване на изображенията се извършва чрез провеждане на числен експеримент [2]. Допуска се, че предавателят и целта, обект на наблюдение, се движат в Декартовата координатна система $Oxyz$. Позицията на предавателя в момент на изобразяване на целта се описва с вектор-координати: $x^s = -20$ m; $y^s = -50$ m; $z^s = 2 \cdot 10^7$ m. Модул на вектор - линейно изместване е $V_s = 2900$ m/s. Вектор-координатите на приемника са: $x^r = 250$ m; $y^r = 150$ m; $z^r = 30$ m. Целта, обект на наблюдение се описва със следните параметри: модул на вектора – линейно изместване $V = 1000$ m/s; $\alpha = \pi/2$; $\beta = \pi/2$; $\gamma = 0$. Вектор-координатите на масовия център на обекта в момента $p = N/2$: $x_{00}(0) = 45$ m; $y_{00}(0) = 12.5$ km; $z_{00}(0) = 3$ km.

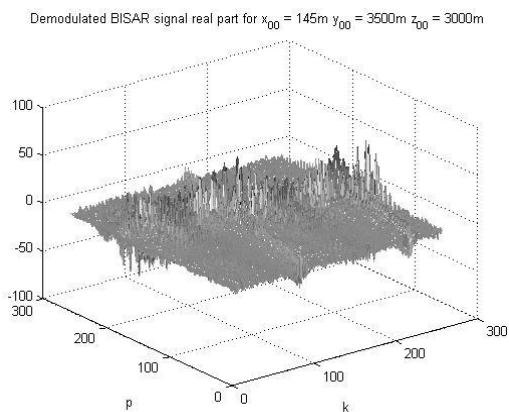
Параметри, формиращи BGISAR фазово модулирания с код на Barker сигнал са: дължина на вълната $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ m, период на повторение на импулса $T_p = 2 \cdot 10^{-3}$ s, продължителност на кодовата последователност на Barker $T = 10^{-8}$ s, брой на отчетите по разстояние $K = 256$, носеща честота $f = 10^{10}$ Hz, период на вземане на отчет от Barker сигнала $\Delta T = T/K = 1.56 \cdot 10^{-8}$ s, брой излъчени импулси $N = 256$. Триммерната решетка, в която е разположен обектът е с размери $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 1$ m. BGISAR сигналят, компресираният по разстояние и азимут BGISAR сигнал за $x_{00}(0) = 45$ m.; $y_{00}(0) = 12.5$ km.; $z_{00}(0) = 3$ km. са илюстрирани на Фигури 4.80, 4.81, 4.82, 4.83 и 4.84, 4.85. Възстановеното разфокусирано изображение е илюстрирано на Фиг.4.83.



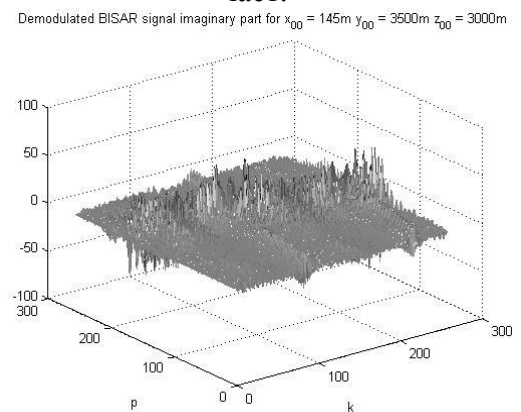
Фиг. 4.80. BGISAR сигнал: реална част.



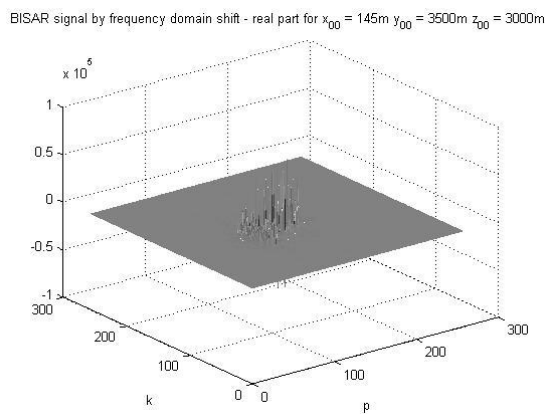
Фиг. 4.81. BGISAR сигнал: имагенерна част.



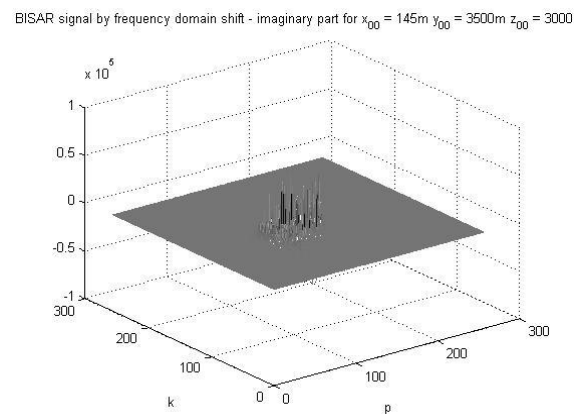
Фиг. 4.82. BGISAR компресиран по разстояние сигнал: реална част.



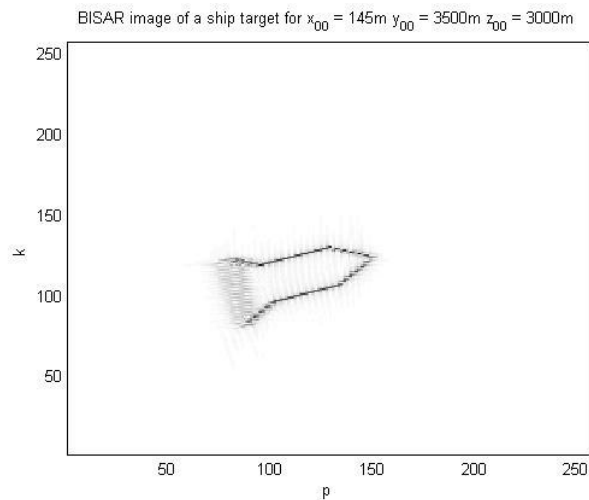
Фиг. 4.83. BGISAR компресиран по разстояние сигнал: имагенерна част.



Фиг. 4.84. BGISAR сигнал след азимутална компресия и спектрално отместване: реална част.

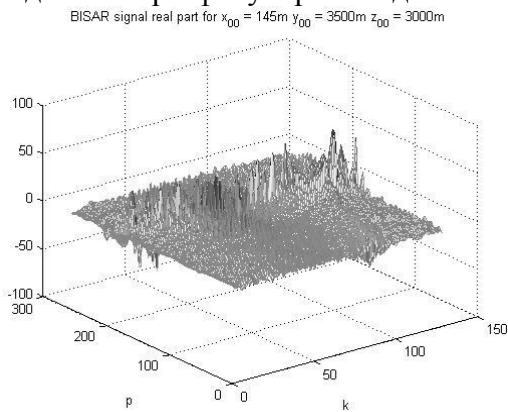


Фиг. 4.85. BGISAR сигнал след азимутална компресия и спектрално отместване: имагенерна част.

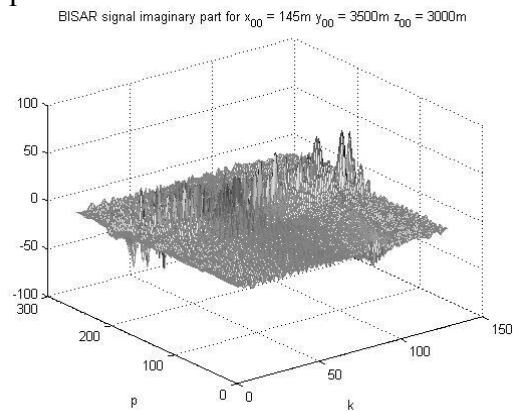


Фиг. 4.86. Нефокусирано BGISAR изображение.

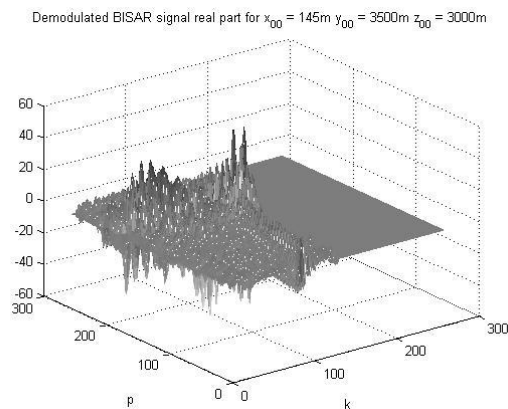
На Фигури 4.87 – 4.92 са описани модела на BGISAR сигнала и резултата от възстановителната процедура – фокусирано изображение. Извършена е апроксимация на фокусиращата функция чрез нейната квадратична компонента a_2 . На Фиг.4.86 се вижда силно разфокусираната двигателна част на ракетата.



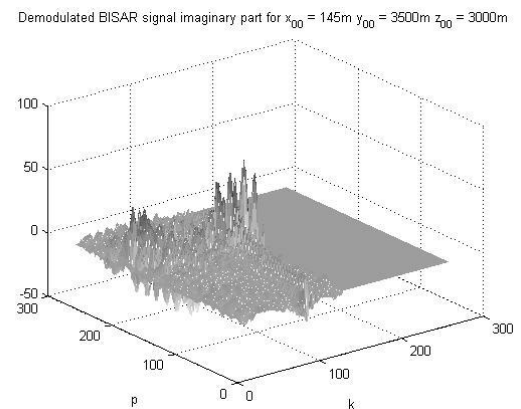
Фиг. 4.87. Фокусиран BGISAR сигнал: реална част.



Фиг. 4.88. Фокусиран BGISAR сигнал: имагенерна част.

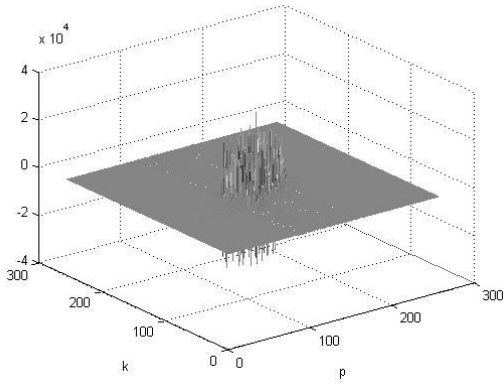


Фиг. 4.89. Фокусиран и компресиран по разстояние BGISAR сигнал: реална част.



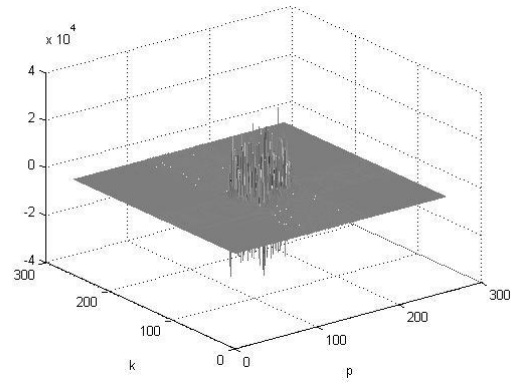
Фиг. 4.90. Фокусиран и компресиран по разстояние BGISAR сигнал: имагенерна част.

BISAR signal by frequency domain shift - real part for $x_{00} = 145\text{m}$ $y_{00} = 3500\text{m}$ $z_{00} = 3000\text{m}$



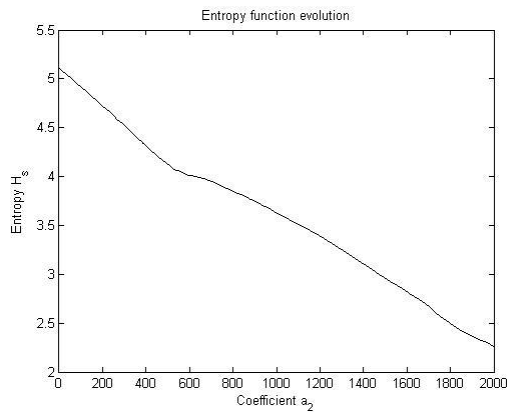
Фиг. 4.91. Фокусиран и компресиран по азимут BGISAR сигнал: реална част.

BISAR signal by frequency domain shift - imaginary part for $x_{00} = 145\text{m}$ $y_{00} = 3500\text{m}$ $z_{00} = 3000\text{m}$



Фиг. 4.92. Фокусиран и компресиран по азимут BGISAR сигнал: имагенерна част.

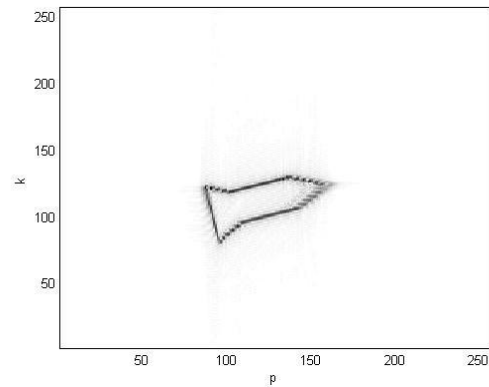
На Фиг.4.93 са изобразени резултатите, получени от пресмятане на оценяваща изображението ентропийна функция за коефициент a_2 . Минималната стойност на оценяващото качество на изображението функция е в диапазона от стойности на коефициента a_2 от 0 до 2000. Коефициентът a_2 се мени от първоначалната до крайната стойности със стъпка $\Delta=1$ като минимална стойност се получава за коефициент $a_2=2000$ с ентропия $H_s = 2.31$. Резултатът от действието на автофокусиращата процедура е илюстриран на Фиг.5.27.



Фиг. 4.93. Процедура по пресмятане на Ентропийна функция за коефициент a_2 .

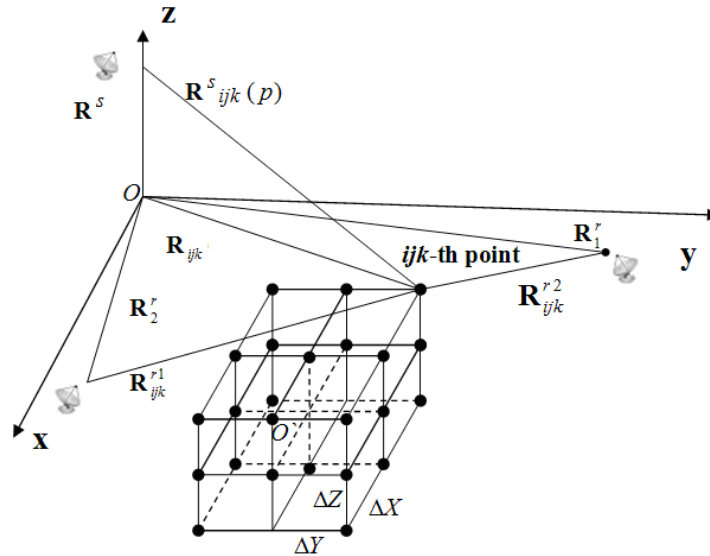
Качеството на полученото изображение е добро с ясно очертаващи се контури.

BISAR image of a ship target for $x_{00} = 145\text{m}$ $y_{00} = 3500\text{m}$ $z_{00} = 3000\text{m}$



Фиг. 4.94. Фокусирано BGISAR изображение

4.7. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни BSAR сигнали с линейна честотна модулация и два приемника (многостатичен случай) и възстановяване на комплексно изображение на стационарна цел

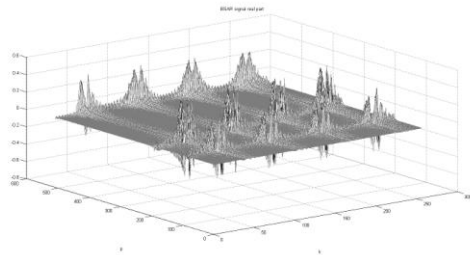


Фиг. 4.95. Топология на BSAR

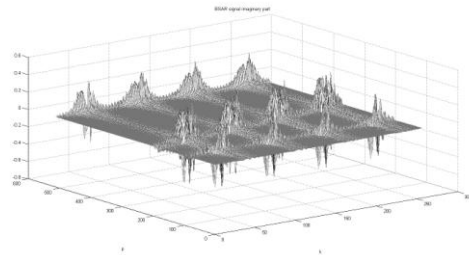
Извършен е числен експеримент [56], за да се докажат свойствата на тримерния модел на SAR сигнала с ЛЧМ и да се потвърди коректността на процедурата по възстановяване на изображението на BSAR системата (Фиг.4.95), включващо двумерно бързо преобразуване на Фурие, изпълняващо компресия по разстояние и азимут. Допуска се, че геометрията на целта и движението на радиолокационната станция са описани в тримерна Декартова координатна система на наблюдение - $Oxyz$. Вектор – координатите на първия точков излъчвател съвпада с вектор – координатите на началната точка на обекта, които имат следните стойности $x_{ijk}^0 = 0\text{ m}$, $y_{ijk}^0 = 0\text{ m}$, $z_{ijk}^0 = 0\text{ m}$; Обектът представлява шест етажна сграда със следните размери – височина 15 m, широчина 120 m, дълбочина 55 m; Началните координати на сателитната радиолокационна станция са: $x_s = -8,5\text{ km}$, $y_s = 1,2\text{ km}$, $z_{0s} = 200\text{ km}$; скоростта на сателита по координатните оси е $V_x = V_y = 1404\text{ m/s}$ $V_z = 0\text{ m/s}$, вектор-координатите на първата приемна станция са: $x_1^r = 2,5\text{ km}$, $y_1^r = 1,2\text{ km}$, $z_1^r = 300\text{ m}$; вектор-координатите на втората приемна станция са: $x_2^r = 2,5\text{ km}$, $y_2^r = 2,2\text{ km}$, $z_2^r = 300\text{ m}$. Разстоянието между първия и втория приемник има стойност 1000 m по координатна ос у. Параметрите на импулсите от BSAR системите са както следва: дължината на вълната е $\lambda = 3.10^{-2}\text{ m}$; времевата продължителност на ЛЧМ импулсът е $T = 10^{-6}\text{ s}$; периодът на повторение на импулса е $T_p = 5.10^{-3}\text{ s}$; носещата честота е $f = 10^{10}\text{ Hz}$; широчината на честотната лента по време на излъчваните ЛЧМ импулси е $\Delta F = 3.10^8\text{ Hz}$; пълният брой излъчени импулси е $N = 512$, броят на отчети по разстояние на ЛЧМ импулс е $K = 256$. Математическото очакване на нормализираните интензивности на точковите излъчватели разположени по повърхността на морската цел – кораб е $a_{ijk} = 0.01$.

Експерименталните резултати са представени в следните Фигури. На Фигури 4.96, 4.97 и 4.105, 4.106 е илюстриран демодулиран BSAR сигнал с реална и имагинерна компоненти, измерен респективно в първия и втория приемник. На Фигури 4.98, 4.99 и

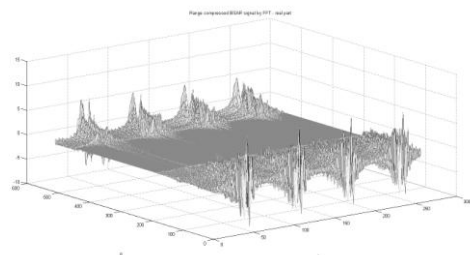
4.109, 4.110 са илюстрирани компресиран по разстояние BSAR сигнал с реална и имагинерна части, измерени в първия и респективно втория приемник. На Фигури 4.102, 4.103 и 4.109, 4.110 са илюстрирани компресиран по азимут BSAR сигнал с реална и имагинерна част, измерени в първия и респективно втория приемник. На Фигури 4.102, 4.103 и 4.111, 4.112 са илюстрирани компресирания по азимут BSAR сигнал и неговите реална и имагинерна компоненти, измерени в първия и втория приемник. На Фигури 4.104 и 4.113 са представени единични комплексни изображения с модул и фаза на изображенията получени респективно в първия и втория приемник.



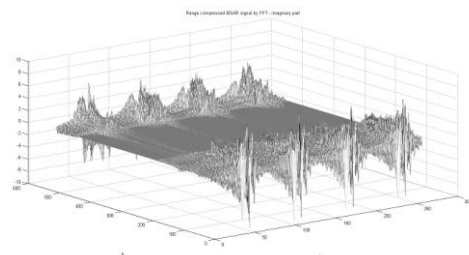
Фиг. 4.96. Реална част на демодулирания BSAR сигнал в първия приемник



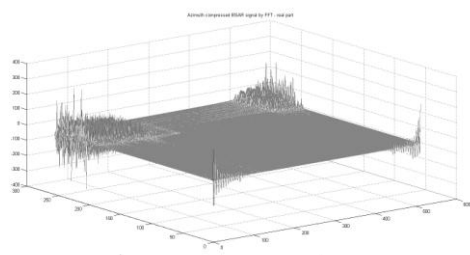
Фиг. 4.97. Имагинерна част на демодулирания BSAR сигнал в първия приемник



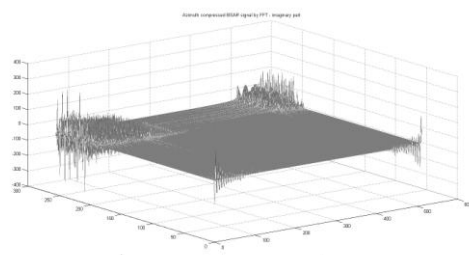
Фиг. 4.98. Реална част на компресирания по разстояние BSAR сигнал в първия приемник



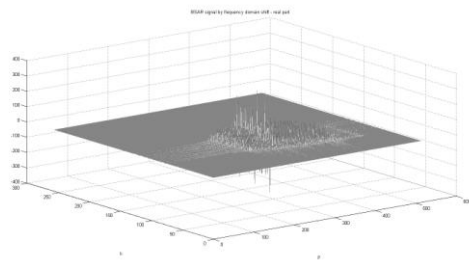
Фиг. 4.99. Имагинерна част на компресирания по разстояние BSAR сигнал в първия приемник



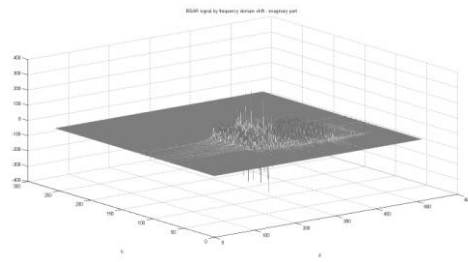
Фиг. 4.100. Реална част на компресирания по азимут BSAR сигнал в първия приемник.



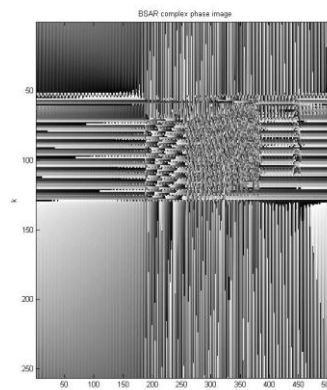
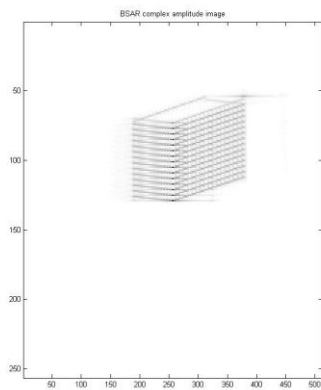
Фиг. 4.101. Имагинерна част на компресирания по азимут BSAR сигнал в първия приемник.



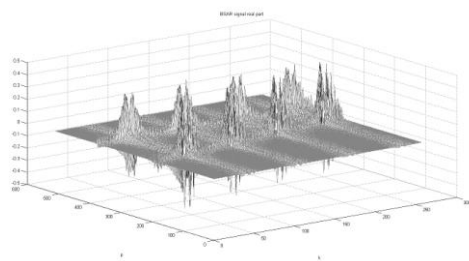
Фиг. 4.102. Реална част на честотно отместения и компресиран по азимут BSAR сигнал в първия приемник



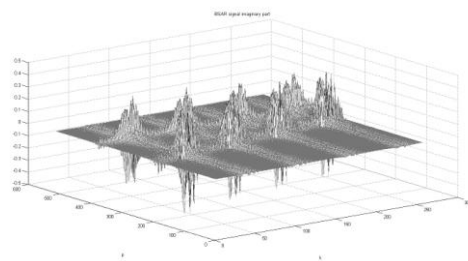
Фиг. 4.103. Имагенерна част на честотно отместения и компресиран по азимут BSAR сигнал в първия приемник



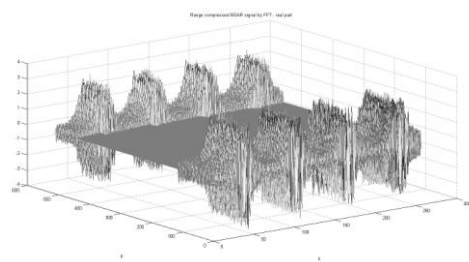
Фиг. 4.104. Модул и фаза на единично комплексно изображение в първия приемник



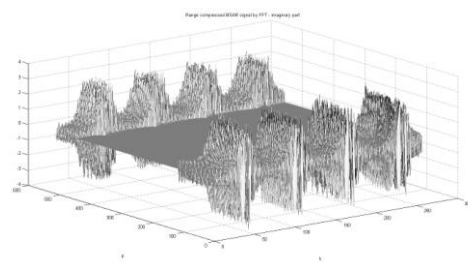
Фиг. 4.104. Реална част на демодулирания BSAR сигнал във втория приемник.



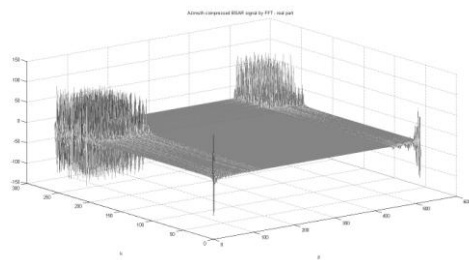
Фиг. 4.106. Имагенерна част на демодулирания BSAR сигнал във втория приемник.



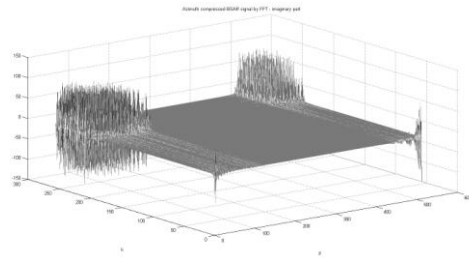
Фиг. 4.107. Реална част на комплексния BSAR във втория приемник.



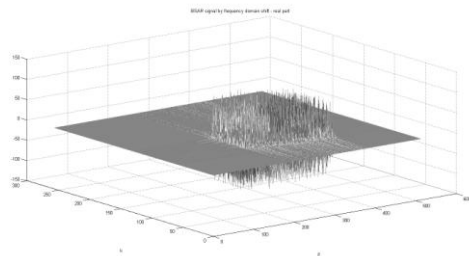
Фиг. 4.108. Имагенерна част на комплексния BSAR във втория приемник.



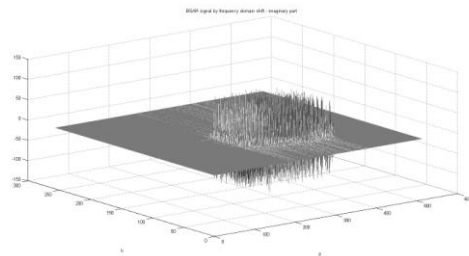
Фиг. 4.109. Реална част на компресирания по азимут BSAR сигнал във втория приемник.



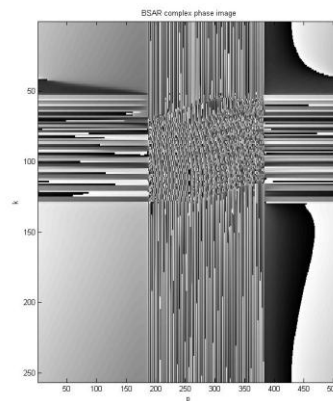
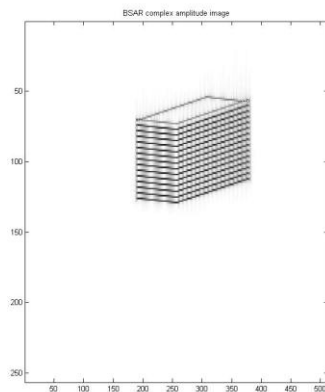
Фиг. 4.110. Имагинерна част на компресирания по азимут BSAR сигнал във втория приемник.



Фиг. 4.111. Реална част на честотно отместения и компресиран по азимут фокусиран BSAR сигнал



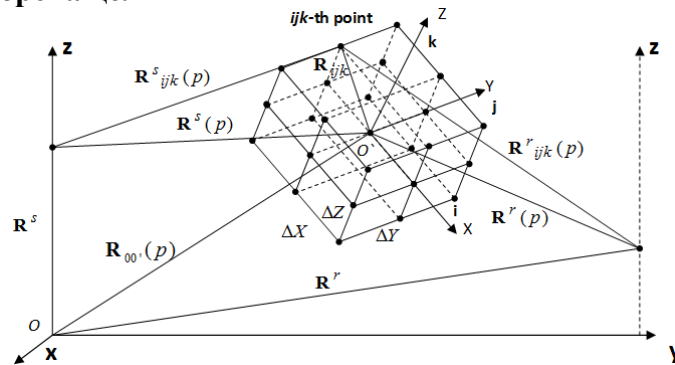
Фиг. 4.112. Имагинерна част на честотно отместения и компресиран по азимут фокусиран BSAR сигнал



Фиг. 4.113. Амплитудно и фазово изображение във втория приемник

Сравнителният анализ на двете единични комплексни изображения илюстрират функционалността на описаната геометрия, кинематичните характеристики и модела на сигнала на BSAR топология с няколко приемника. Между двете единични комплексни изображения съществуват разлики в модула и фазата поради базовата линия между приемниците. Фазовата разлика в единичните комплексни изображения може да се използва за генериране на комплексна интерферограма, която може да се приложи при тримерни измервания на наблюдаваната повърхност.

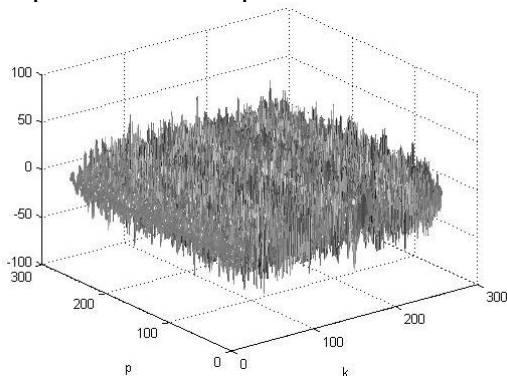
4.9. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни BFISAR сигнали с линейна честотна модулация със стационарни предавател и приемник на радиолокационната система и възстановяване (реконструкция) на комплексно изображение на морска цел



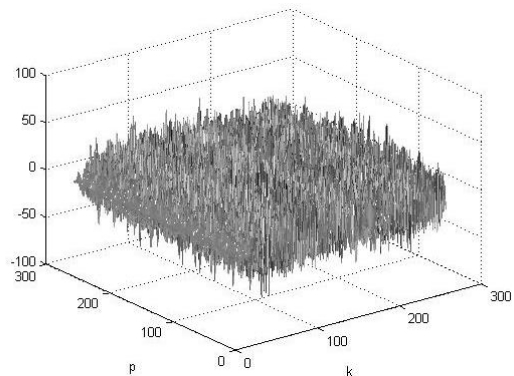
Фиг. 4.122. Топология на BFISAR

За удостоверяване на коректността на геометричната структура на BFISAR системата (Фиг.4.122), процесът по формиране на сигнала и възстановяване на изображението са проведени числени експерименти с изготвените модели. Предполага се, че целта се движи праволинейно в Декартова координатна система $Oxyz$. Вектор – координатите на предавателната станция са $x^s = -50$ m; $y^s = 0$ m; $z^s = 25$ m. Вектор – координатите на приемната станция са: $x^r = 50$ m; $y^r = 0$ m; $z^r = 12$ m. Параметрите на наблюдавания обект са както следва: модул на вектор - скоростта $V = 14$ m/s; $\alpha = \pi/2$; $\beta = -\pi$; $\gamma = \pi/2$. Вектор – координатите на масовия център в момента $p = N/2$: $x_{00}(0) = 25$ m; $y_{00}(0) = 50$ m; $z_{00}(0) = 0$ m.

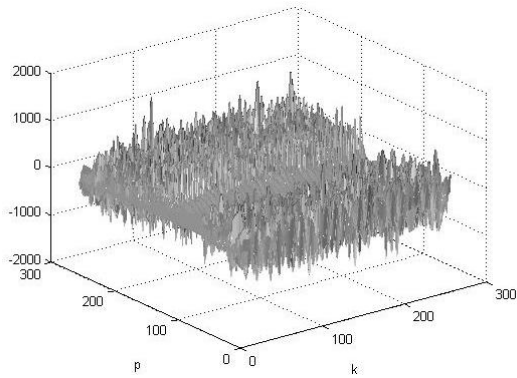
Параметрите на ЛЧМ BFISAR сигнал са: дължина на вълната $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ m, период на повторение на импулсите $T_p = 3,2 \cdot 10^{-3}$ s, широчина на ЛЧМ импулса $T = 9 \cdot 10^{-6}$ s, брой ЛЧМ отчети от предадения сигнал $K = 256$, носеща честота $f = 10^{10}$ Hz., период на вземане на ЛЧМ отчет $\Delta T = T / K = 1,56 \cdot 10^{-8}$ s, широчина на честотната лента на ЛЧМ $\Delta F = 2 \cdot 10^8$ Hz, ниво на ЛЧМ $b = 1,39 \cdot 10^{14}$, пълен брой излъчени импулси $N = 256$. Тримерната координатна мрежа, в която се намира обектът притежава клетки с размер: $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 0,5$ m. Демодулираните и компресирани по разстояние и азимут комплексни BISAR сигнали, при които масовият център на обекта в момента на изобразяване е със следните координати $x_{00}(0) = 0$ m $y_{00}(0) = 20$ m $z_{00}(0) = 0$ m са описани на Фигури 4.123, 4.124, 4.125, 4.126 и 4.127, 4.128. Разфокусираното изображение след процеса на възстановяване е показано на Фиг.4.129



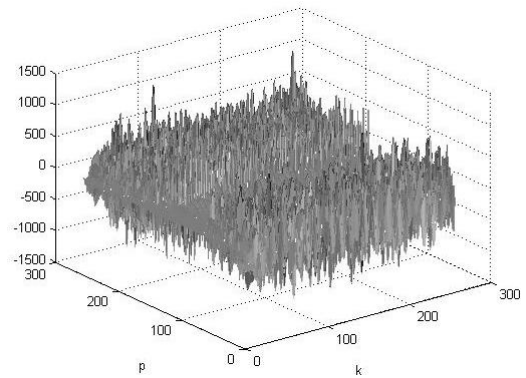
Фиг. 4.123. Реална част на BFISAR сигнала.



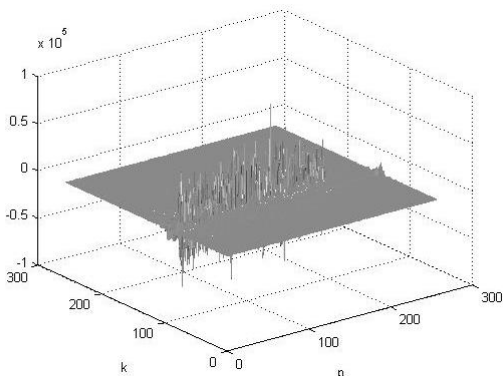
Фиг. 4.124. Имагенерна част на BFISAR сигнала.



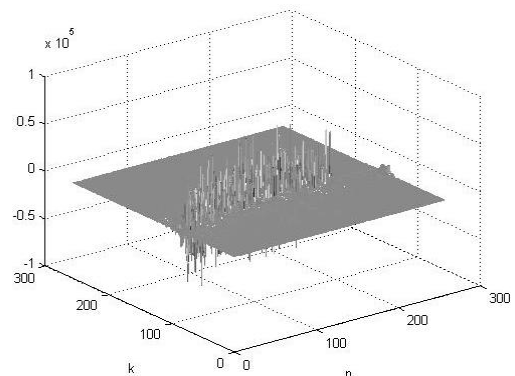
Фиг. 4.125. Реална част на компресирания по разстояние BFISAR сигнал



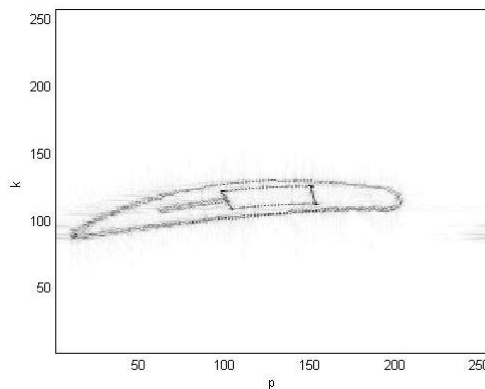
Фиг. 4.126. Имагенерна част на компресирания по разстояние BFISAR сигнал



Фиг. 4.127. Реална част на отместения и компресиран по разстояние BFISAR сигнал.

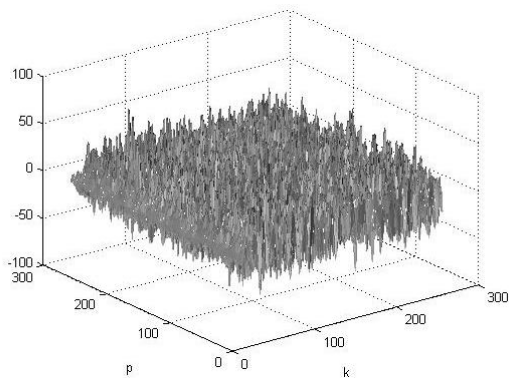


Фиг. 4.128. Имагенерна част на отместения и компресиран по разстояние BFISAR сигнал.

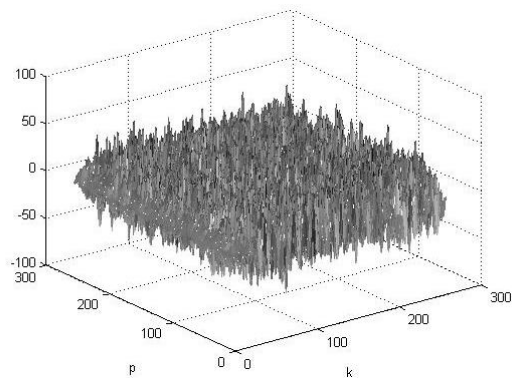


Фиг. 4.129. Разфокусирано изображение на BFISAR системата.

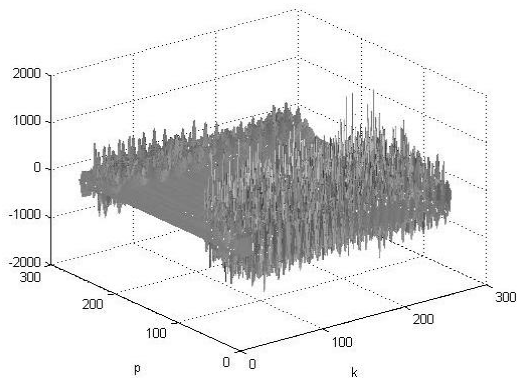
На Фигури 4.30 - 4.135 BFISAR са описани моделът на сигнала и резултатите от възстановяващите процедури за получаване на фокусирано изображение на целта. Фокусиращата функция е реализирана само с нейната квадратична компонента:



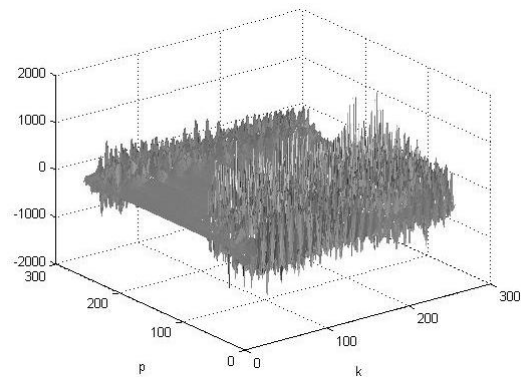
Фиг. 4.130. Реална част на фокусиран BFISAR сигнал



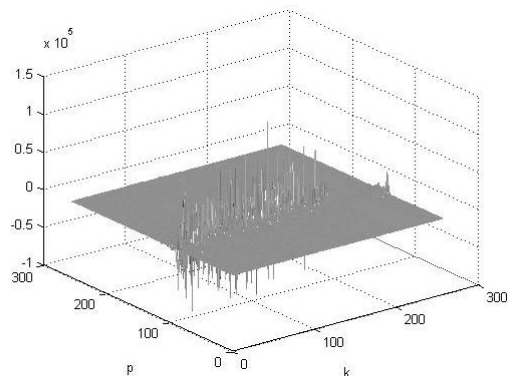
Фиг. 4.131. Имагенерна част на фокусиран BFISAR сигнал



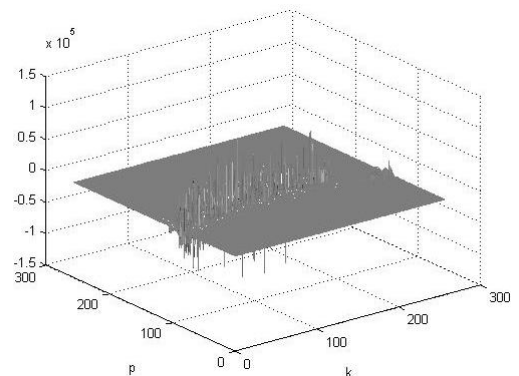
Фиг. 4.132. Реална част на компресиран по разстояние фокусиран BFISAR сигнал



Фиг. 4.133. Имагенерна част на компресиран по разстояние фокусиран BFISAR сигнал

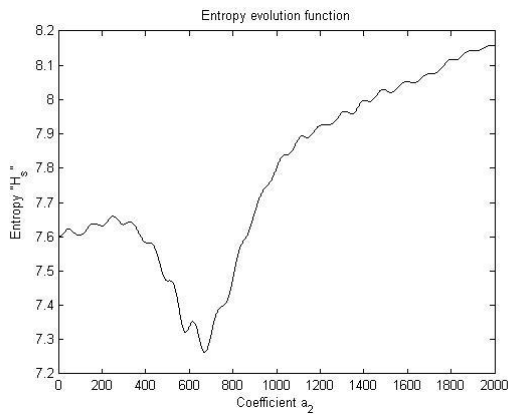


Фиг. 4.134. Реална част на компресиран по азимут фокусиран BFISAR сигнал

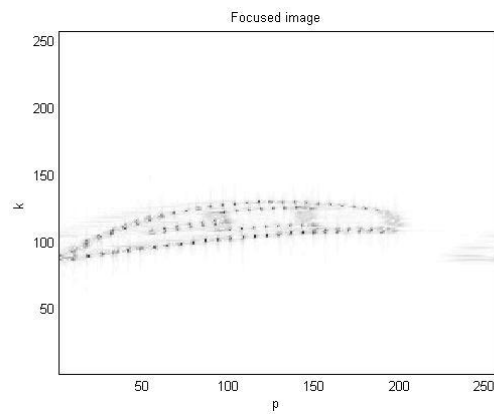


Фиг. 4.135. Имагенерна част на компресиран по азимут фокусиран BFISAR сигнал

На Фиг.4.136 е илюстрирано изменението на ентропийната функция при промяна на коефициента a_2 . Минималната стойност на ентропийната функция се намира в диапазона на вариране на коефициента a_2 от 0 до 671 със стъпка $\Delta=0.5$ е $H_s = 0.347$, като за тази стойност фокусираното изображение има следния вид, показан на Фиг.4.137.



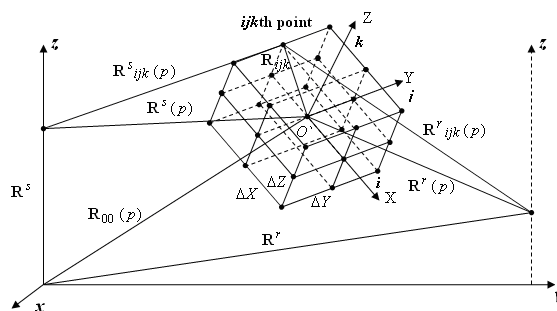
Фиг. 4.136. Изчисление на ентропийната функция за коефициент a_2 .



Фиг. 4.137. Фокусирано изображение на BFISAR системата.

Качеството на полученото изображение е удовлетворително. Доказателство за това са ясно изобразените блестящи точки от контура на обекта.

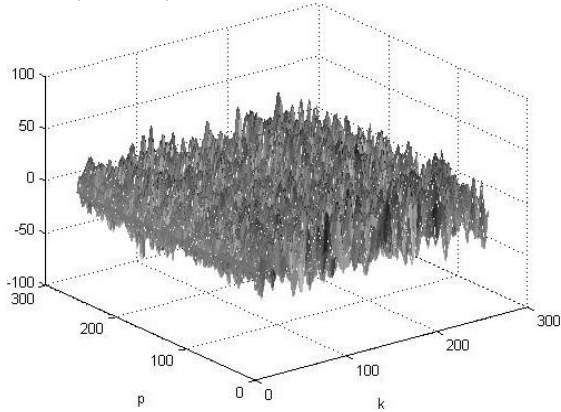
4.10. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни BFISAR сигнали с линейна честотна модулация и възстановяване на изображението на морска цел



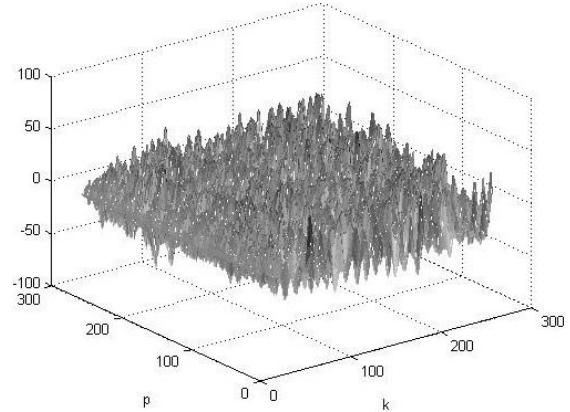
Фиг. 4.138. Топология на BFISAR

За потвърждение на коректността на разработената BFISAR геометрия (Фиг.4.138), модел на сигнала и процедура по възстановяване на изображението е проведен числен експеримент. Приема се, че целта се движи праволинейно в Декартова 3-D координатна система на наблюдение $Oxyz$. Вектор-координатите на предавателя са: $x^s = -250$ m; $y^s = 0$ m; $z^s = 15$ m. Вектор координатите на приемника са: $x^r = 300$ m; $y^r = 0$ m; $z^r = 12$ m. Параметрите на целта са: модул на вектора -скорост $V = 14$ m/s; $\alpha = \pi/2$; $\beta = -\pi$; $\gamma = \pi/2$. Вектор-координатите на масовия център в момент $p = N/2$: $x_{00}(0) = 25$ m; $y_{00}(0) = (50, 150)$ m; $z_{00}(0) = 0$ m. Вектор-координатите на точката R от опорната равнина са $x_0(0) = 0$ m; $y_0(0) = 0$ m; $z_0(0) = 0$ m. Параметрите на ЛЧМ ISAR импулс са: дължина на вълната $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$ m, период на повторение на импулса $T_p = 3,2 \cdot 10^{-3}$ s, ЛЧМ широчина на импулса $T = 9 \cdot 10^{-6}$ s, брой на отчетите на ЛЧМ излъчения сигнал $K = 256$, носеща честота $f = 10^{10}$ Hz, ЛЧМ период на вземане на отчет $\Delta T = T/K = 1,56 \cdot 10^{-8}$ s, широчина на лентата на ЛЧМ сигнал $\Delta F = 2 \cdot 10^8$ Hz, ниво на ЛЧМ $b = 1,39 \cdot 10^{14}$, брой на излъчените импулси $N = 256$. Геометрията на целта

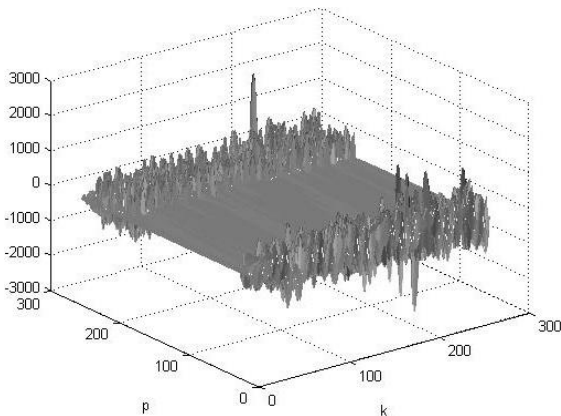
е описана в 3-D еквилистантна решетка с размери на клетката $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 0.5$ m. Интензивностите на точковите излъчватели са $a_{ijk} = 0.01$. BFISAR сигналът, BFISAR компресираният по разстояние сигнал и BFISAR компресирания по азимут сигнал за $x_{00}(0) = 25$ m; $y_{00}(0) = 150$ m; $z_{00}(0) = 0$ m са илюстрирани на Фигури 4.139, 4.140, 4.141, 4.142, 4.143 и 4.144.



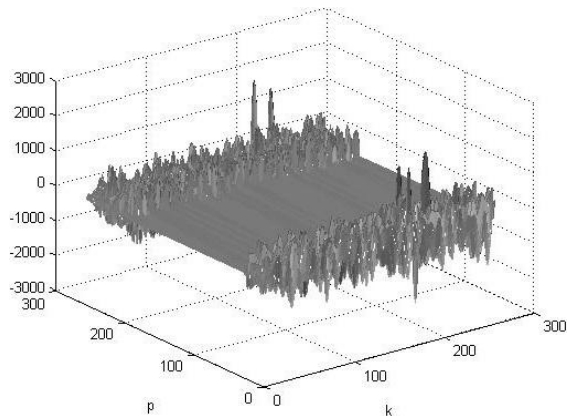
Фиг. 4.139. Реална част на BFISAR сигнала



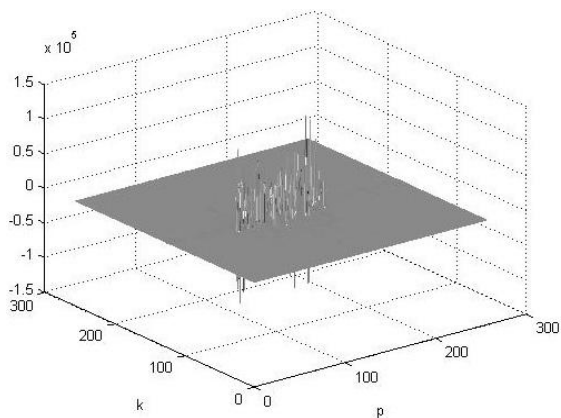
Фиг. 4.140. Имагенерна част на BFISAR сигнала.



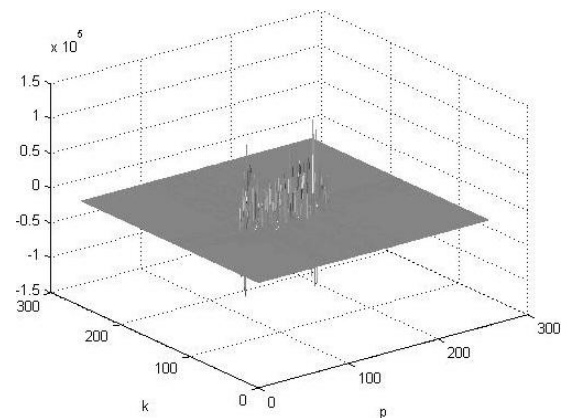
Фиг. 4.141. Реална част на компресирания по разстояние BFISAR сигнал



Фиг. 4.142. Имагенерна част на компресирания по разстояние BFISAR сигнал

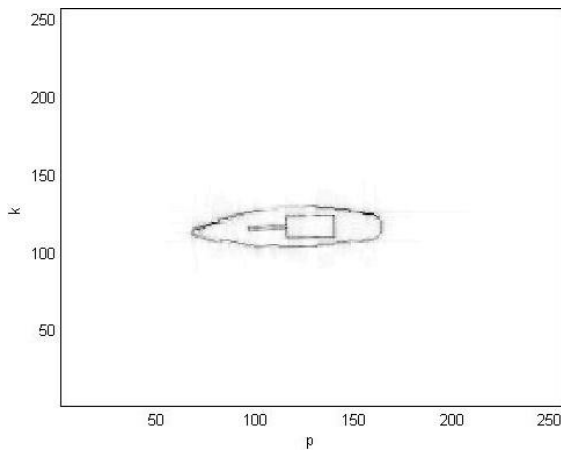


Фиг. 4.143. Реална част на компресирания по азимут и честотно отместен BFISAR сигнал.

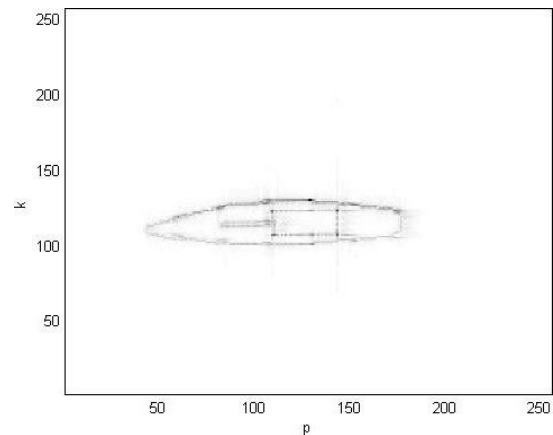


Фиг. 4.144. Имагенерна част на компресирания по азимут и честотно отместен BFISAR сигнал.

Изображенията на корабна цел от BFISAR система с позиция a : $x_{00}(0) = 25$ m, $y_{00}(0) = 150$ m, $z_{00}(0) = 0$ m, и позиция b : $x_{00}(0) = 25$ m, $y_{00}(0) = 50$ m, $z_{00}(0) = 0$ m са представени на Фиг.4.145, 4.146.



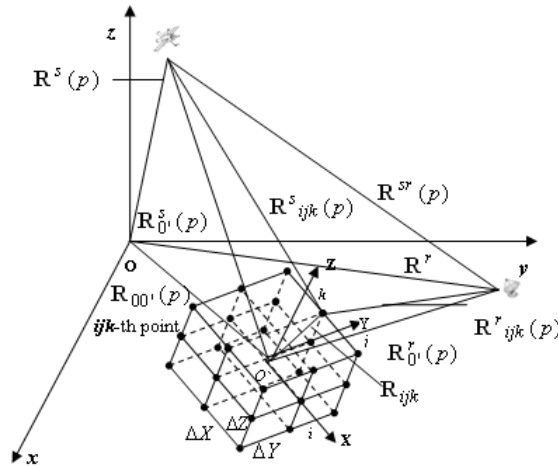
Фиг. 4.145. Крайно изображение получено на позиция $y_{00}=150$ m от BFISAR системата



Фиг. 4.146. Крайно изображение получено на позиция $y_{00} = 50$ m. от BFISAR системата

Качеството на получените изображения е удовлетворително, доказателство за това са добре очертаващи се контури на изображението.

4.11. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексния GPS BGSAR сигнал и изобразяване на въздушна цел – хеликоптер



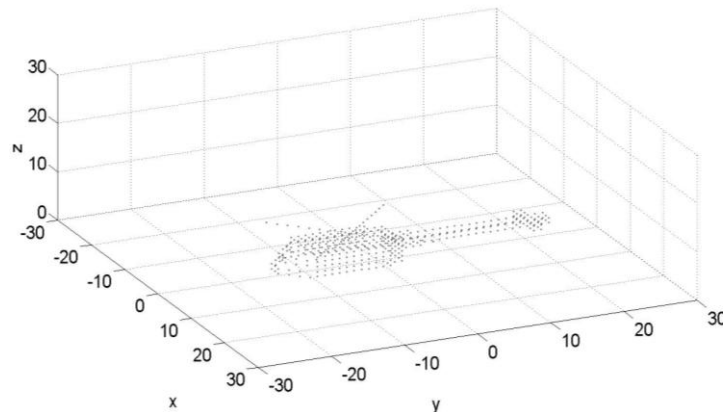
Фиг. 4.147. Топология на BGSAR

Извършен е числен експеримент, за да се потвърдят свойствата на триизмерната BGSAR топология (Фиг.4.147), моделът на сигнал модулиран с GPS (precision) P код и коректността на извършената цифрова процедура по възстановяване на сигнала. Допуска се, че летящ хеликоптер извършва праволинейно движение в тримерна Декартова координатна система $Oxyz$ с BGSAR топология (Фиг.4.147). GPS предавателя облъчва целта с последователност от сигнали модулирани с GPS P код.

Модулът вектор-разстояние предавател-обект-приемник (Фиг.4.147) се изчислява с израза (2.40). Топологията на BGSAR системата (Фиг.4.147) включва морска цел, извършваща праволинейно движение, стационарен предавател и стационарен приемник, разположени на земната повърхност. За цел се приема

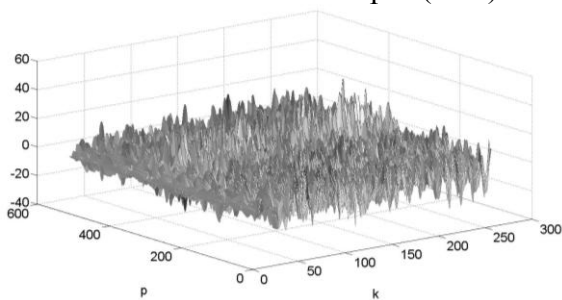
хеликоптер, преминаващ между предавателя и приемника. В експеримента целта се моделира като съвкупност от точкови излъчватели (Фиг.4.148). Процесът на получаване на детерминираната компонента на сигнала (3.26) и процедурите по възстановяване (3.78, 3.79) са илюстрирани чрез числените резултати, получени при следните изходни данни на експеримента.

GPS сателита в момента $p = N/2$: се описва с координатите $x^s = 1,5 \cdot 10^4$ m, $y^s = 2 \cdot 10^4$ m; $z^s = 2 \cdot 10^5$ m. Скоростта на GPS сателитната станция: $v_x^s = 3819,206$ m/s, $v_y^s = 3819,206$ m/s, $v_z^s = 0$ m/s. Вектор-координати описващи позицията на стационарния GPS приемник: $x^r = 970$ m, $y^r = 10^3$ m и $z^r = 30$ m. Параметри на траекторията на целта: вектор-скорост $V = 80$ m/s; насочващи ъгли на вектора скорост: $\alpha = \pi/4$, $\beta = \pi/4$, $\gamma = 3\pi/2$; вектор-координати на масовия център на целта в момента $p = N/2$: $x_{00} = 20$ m, $y_{00} = 10$ m, $z_{00} = 150$ m. Параметри на модулирания с GPS P фазов код сигнал: дължина на вълната $\lambda = 19,1 \cdot 10^{-2}$ m, честота $f = 1,57 \cdot 10^9$ Hz, брой GPS P кодови елементи в сегмент $K = 13$, брой на отчетите по разстояние 256, брой на сегменти от GPS P фазов код по време на синтеза на апертурата $N = 512$, интервал на регистрация на отразените сигнали $T_p = 10^{-2}$ s. Целта – хеликоптер е изобразена в тримерна координатна система с размери на координатната решетка $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 1$ m (Фиг.4.145).

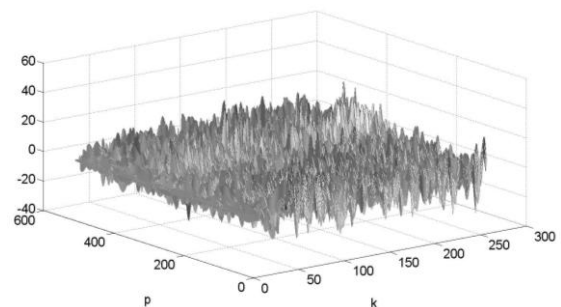


Фиг. 4.148. Изображение на хеликоптер изобразен в тримерна координатна система

На Фигури от Фиг.4.149 до Фиг.4.154 са изобразени числените резултати от моделирането, обработката на BGSAR сигнала и възстановяване на изображението. Реалната и имагинерна част на BGSAR сигнала, илюстрирани на Фиг.4.149 и Фиг.4.150, се изчисляват на база на израз (3.29).

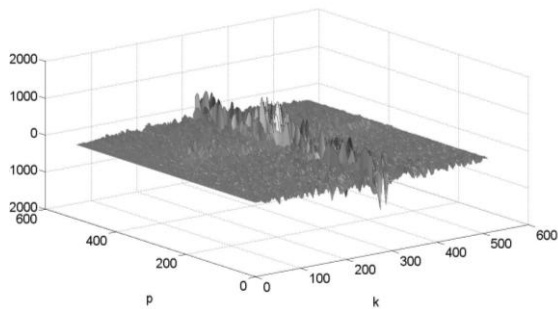


Фиг. 4.149. Реална част на BGSAR сигнала

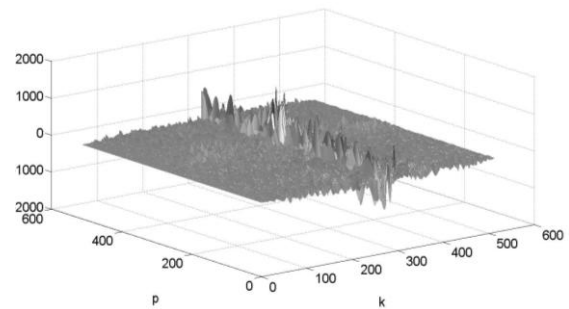


Фиг. 4.150. Имагинерна част на BGSAR сигнала

Реалната и имагинерна част илюстрирани на Фиг.4.148 и Фиг.4.149 на компресирания по разстояние BGSAR сигнал се изчисляват с израз (3.79).

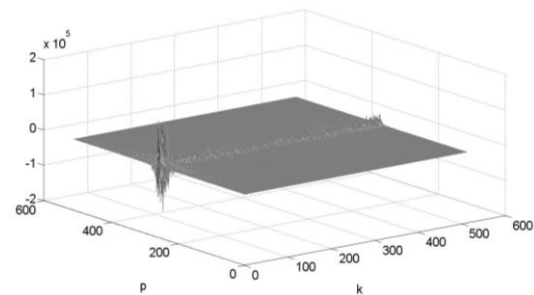


Фиг. 4.151. Реална част на компресирания по разстояние BGSAR сигнал

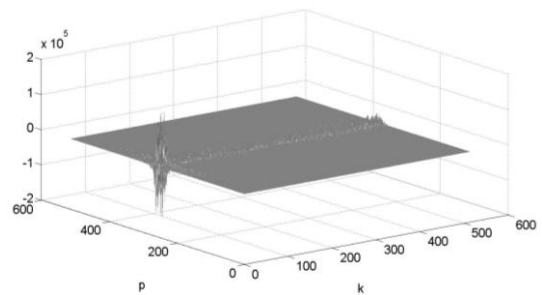


Фиг. 4.152. Имагинерна част на компресирания по разстояние BGSAR сигнал

Реалната и имагинерна част на компресирания по азимут BGSAR се изчисляват с израз (3.79). Фигури 4.153 и 4.154 изобразяват честотно отместване на компресирания по азимут сигнал.



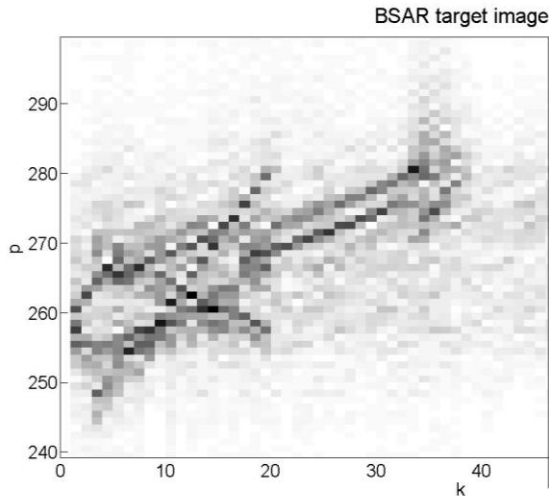
Фиг. 4.153. Реална част на компресирания по азимут BGSAR сигнал



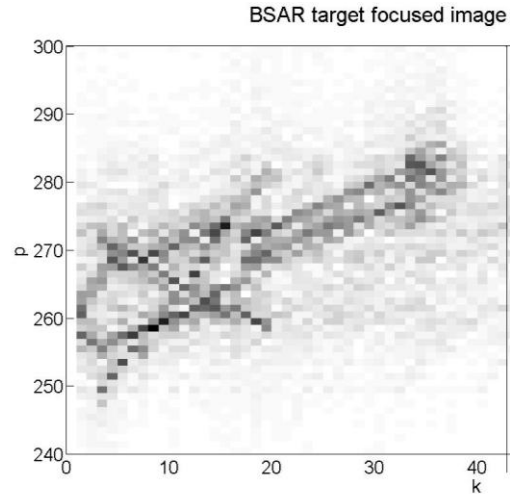
Фиг. 4.154. Имагинерна част на компресирания по азимут BGSAR сигнал

На Фиг.4.155 е илюстрирано изображение на хеликоптер след моделиране на сигнала чрез BSAR топология и реконструкция, включваща компресия по разстояние чрез крос корелация и компресия по азимут чрез инверсна трансформация на Фурие. Задоволителното качество на изображенията, получени в BGSAR системи се разглежда като илюстрация на разделителната способност по разстояние на сигнала, модулиран с GPS P фазов код [88, 94, 103].

На Фиг.4.156 е илюстрирано изображение на хеликоптер, получено от BGSAR топология след извършване на всички етапи от процеса по реконструкция, включващ фазова корекция от висок ред с оптимална стойност на коефициентите $a_2 = 49$ и ентропия $H = 0.898$.



Фиг. 4.155. BGSAR изображение на хеликоптер



Фиг. 4.156. BGSAR Изображение на хеликоптер след прилагане на автофокусираща процедура

Качеството на изображението се подобрява, което се илюстрира с по-малко разфокусиране в областта на опашката на хеликоптера. Резултатите от числения експеримент доказват че сигнали, модулирани с GPS P фазов код могат да намерят приложение в BGSAR топология за изобразяване на подвижни цели. В този случай GPS предавателят е некоопериран с BGSAR системата за наблюдение и визуализиране на целите, което е от значение за постигане скритост и неуязвимост на процеса на наблюдение.

4.12. Изводи към четвърта глава

С цел доказване на коректността на разработените в дисертационния труд топологии на апертурния синтез, геометрични и кинематични математически модели на наблюдаваните обекти при различни SAR сценарии, математическите модели на комплексните сигнали е извършено числено моделиране на процеса на получаване на комплексни сигнали при апертурния синтез и възстановяване (реконструкция) на изображенията. На базата на изградените алгоритми за синтез на комплексните сигнали и реконструкция на изображенията са разработени програмни продукти в среда Matlab 6.5. Привеждат се резултатите от числените експерименти, както следва:

1. Числено моделиране на процеса на формиране комплексни сигнали и реконструкция на комплексни SAR интерферограми на сложна повърхност.
2. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни SAR сигнали и възстановяване на изображението на подвижна морска цел.
3. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни BFISAR сигнали от кратковременни импулси и възстановяване на изображението на морска цел.
4. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни ISAR сигнали с линейна честотна модулация и възстановяване на изображението на морска цел.
5. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни BFISAR сигнали с линейна честотна модулация и възстановяване на изображението на морска цел.

6. Числено моделиране на процеса на получаване на BGISAR комплексен сигнал и реконструкция на изображението.
7. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни BSAR сигнали с линейна честотна модулация и два приемника (многостатичнен случай) и възстановяване на комплексно изображение на стационарна цел.
8. Моделиране на процеса на формиране на комплексния GPS BGSAR сигнал и изобразяване на въздушна цел – хеликоптер.
9. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни BFISAR сигнали с линейна честотна модулация със стационарни предавател и приемник на радиолокационната система и възстановяване (реконструкция) на комплексно изображение на морска цел.
10. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексни BFISAR сигнали с линейна честотна модулация и възстановяване на изображението на морска цел.
11. Числено моделиране на процеса на формиране на комплексния GPS BGSAR сигнал и изобразяване на въздушна цел – хеликоптер.

НАУЧНИ, НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

I. Научни приноси

1. Чрез анализ на геометрията и кинематиката на различни конфигурации на радиолокационни системи, прилагачи принципа на апертурния синтез са изведени аналитичните изрази, дефиниращи основните геометрични и кинематични характеристики на SAR, InSAR, ISAR, BSAR и BFISAR топологии, описани в различни координатни системи, както следва: SAR топология (обектът и системата на наблюдение са дефинирани в две отделни координатни тримерни системи), SAR интерферометрична топология (обектът и системата на наблюдение са разположение в една тримерна координатна система), ISAR топология (системата на наблюдение и обектът са разположени в една тримерна координатна система), BSAR топология (предавател и два приемника, разположени в една координатна система), BISAR топология (предавателят и приемникът са пространствено разделени и разположени в една тримерна координатна система, а обектът на наблюдение в отделна тримерна координатна система), BFISAR топология (предавателят и приемникът са пространствено разделени и разположени в една тримерна координатна система, а обектът на наблюдение в отделна тримерна координатна система), BGISAR топология (подвижен предавател и стационарен приемник са пространствено разделени и разположени в една тримерна координатна система, а подвижен обект на наблюдение е разположен в отделна тримерна координатна система).
2. Решена е геометричната задача, чрез която е дефиниран метод за определяне на кинематичните параметри на обекта при BFISAR топологии.
3. Предложени са математически модели на сигналите, излъчени от предавателните устройства на радиолокационните системи, използващи принципа на апертурния синтез. Приведени са следните сигнални форми: линейно честотно модулиран (ЛЧМ) сигнал, модулиран с код на Barker, сигнал формиран с кратковременни

импулси, сигнал от предавателя на GPS - coarse acquisition code (C/A фазов код), сигнал от предавателя на GPS - precision code (P фазов код).

4. Дефинирани са нови структурни компоненти на математическите модели на радиолокационните сигнали, отразени от обекти със сложна конфигурация при обратния апертурен синтез, както следва: в SAR модел на ЛЧМ сигнал, отразен от сложен релеф; в BSAR модел на сигнал от кратко временни импулси, в отразен от сложна геометрична повърхност; в ISAR модел на ЛЧМ сигнал, отразен от обект със сложна геометрична форма; в BGSAR модел на сигнал с фазов код на Barker, отразен от обект със сложна геометрична форма BSAR модел на ЛЧМ сигнал, отразен от обект със сложна геометрична форма.

5. Чрез моделите на радиолокационните сигнали (3.3, 3.6, 3.16, 3.29, 3.48), отразени от обекти със сложна форма, е направена оценка на разделителната способност на сигналите с линейна честотна модулация, модулация с код на Barker, модулация със специализираните GPS C/A и P кодове, използвани в системите със синтезирана апертюра.

II. Научно-приложни приноси

1. Разработени са изчислителните процедури за възстановяване (реконструкция) на изображенията от комплексни сигнали, получени при различни топологии на апертурния синтез, като алгоритми за възстановяване на BFISAR изображение от сигнал, формиран като последователност от кратковременни импулси, алгоритми за възстановяване на SAR изображения чрез прилагане на двумерни спектрални компресии на комплексния сигнал в различни топологии на апертурния синтез и алгоритми за възстановяване на SAR изображения чрез прилагане на корелационно-спектрални компресии на комплексен сигнала с фазово-кодова модулация.

2. Доразвит е методът за фазова корекция на комплексния сигнал, отразен от цел със сложна геометрия чрез използване на минимизация на ентропията на изображението на обекта, приложим както при двумерните спектрални компресии, така и при корелационно-спектралните компресии на комплексните сигнали, получени при апертурния синтез.

III. Приложни приноси

1. Съставен е алгоритъм за изчисляване на линейната скорост на обект от ъгъла между траекторията и линията на визиране. Обработката на експериментални данни и данни от числено моделиране на BFISAR система илюстрира висока степен на съвпадение на оценките за скоростта на обекта.

2. Разработени са софтуерни продукти, реализиращи алгоритъма за изчисляване на модула на вектор-разстояние между компонентите на радиолокационната система и обекта при топологии на SAR, InSAR, ISAR, BSAR, BFISAR.

3. Разработени са софтуерни продукти за осигуряване на процеса на получаване на комплексен сигнал, отразен от обект със сложна геометрия, при различни топологии на апертурния синтез.

4. С цел доказване на коректността на разработените топологии на апертурния синтез, геометрични и кинематични математически модели на наблюдаваните обекти при различни SAR сценарии и математическите модели на комплексните сигнали е извършено числено моделиране на процеса на получаване на комплексни сигнали при апертурния синтез и възстановяване (реконструкция) на изображенията. На базата на изградените алгоритми за синтез на комплексните сигнали и реконструкция на изображенията, са разработени програмни продукти в среда Matlab.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиолокационните системи със синтезирана апертура са обект на интензивни изследвания както в теоретичен план, така и тяхната конкретна практическа реализация. Това определя актуалността на разработваните в дисертационния труд задачи. На базата на разработената национална теоретична платформа за изследване на проблемите на апертурния синтез в дисертационния труд са решени задачи, свързани с математическото моделиране на геометрии, кинематики и сигнали при различни конфигурации и топологии на реализация на системите със синтезирана апертура, предложени са алгоритми за възстановяване на изображенията и метод за подобряване на тяхното качество чрез фазова корекция от висок ред. Специфични задачи поставя бистатичната SAR топология, предназначена за периметрова (бариерна) охрана на територии и обекти. В дисертационния труд е предложен метод за оценка на кинематичните параметри на движещата се цел.

На базата на разработените модели, методи и алгоритми в дисертационния труд са проведени числени експерименти по моделиране на процесите на получаване на сигналите, отразени от обектите при апертурния синтез и възстановяването на изображенията на наблюдаваните обекти. С това се постига доказателство за коректността на геометричните и кинематичните модели, моделите на комплексните сигнали и методите за възстановяване на изображенията. Резултатите от дисертационния труд могат да се интерпретират като доразвитие на методите, алгоритмите и програмното осигуряване на системите с синтезирана апертура, доказателство с нови математически инструменти на известни процеси и явления при апертурния синтез, разкриване на нови възможности на системите със синтезирана апертура за определяне на параметрите на движещи се цели.

Все още остават въпроси, свързани с подобряване на качеството на изображенията, използването на като облъчващи сигнали електромагнитните емисии на различни некоопериращи със системата за наблюдение предаватели, като сателитни предавателни системи, телевизионни системи, предавателите на мобилните комуникационни системи. Това очертава пътя на бъдещите изследвания в областта на апертурния синтез.