

## МАТЛАВ РЕАЛИЗАЦИЯ НА BGISAR СИГНАЛИ С КОД НА БАРКЕР МОДУЛАЦИЯ

Тодор П. Костадинов

Институт по Информационни и Комуникационни Технологии,  
Българска Академия на Науките София, България

## MATLAB IMPLEMENTATION OF BGISAR BARKER MODULATED SIGNALS

Todor P. Kostadinov

Institute of Information and Communication Technologies,  
Bulgarian Academy of Sciences Sofia, Bulgaria

**Abstract:** *In the present work the process of formation and structural implementation of algorithms concerning geometrical specifics and signal formation of inverse synthetic aperture radar system with generalized geometry BGISAR in Matlab environment is depicted. In the specific task in the signal formation apparatus, Barker modulated waveform is used and the target is presented as an assembly of point scatterers. A complete algorithm reproducing BGISAR kinematical vector equations and signals is synthesized. Image reconstruction algorithms using the built in operators is built. The implemented program code is duly described.*

**Key words:** *BGISAR Barker model, BGISAR algorithms and program realization*

### 1. Въведение

Под програмна реализация на определен процес или система се разбира тяхното моделиране и симулация чрез използване на аритметично устройство – микропроцесорна система, сигнален процесор или компютърна система извършващи специфични зададени от програмиращия аритметични и логически операции. Програмната реализация се изразява в намиране на математическия модел на описание и неговото преобразуване в удобен за пресмятане процесорен код. Процесорният код дефинира езика с който работи съответната процесорна система, но е трудно разбираем, тъй като е на много ниско ниво. За целта се използват езици от високо ниво, чиято логика се изразява в разширена функционалност и интуитивни за програмиращия азбука и оператори. Звеното извършващо преобразуване на информацията от език на високо ниво в език на ниско ниво се заема от програмите транслатори. Бистатични конфигурации на системи за изобразяване с инверсна синтезирана апертура (ISAR) са предложени в [1, 2]. Математически модел на ISAR система с линейно честотна модулация в среда Matlab е разгледан в [3]. Няколко BSAR техники за възстановяване на изображенията се разглеждат в [4-7]

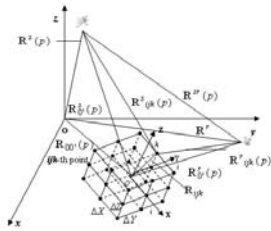
Фокусът на настоящата работа е върху пълното програмно моделиране на математическия апарат описващ кинематичните векторни уравнения, моделът на формиране и възстановяване на сигнала и геометричните особености на радиолокационна система с инверсна синтезирана апертура и обобщена бистатична геометрия BGISAR. Процесът на моделиране включва дефиниция на променливите участващи

в математическия апарат. Необходимо е и дефиниране на помощни променливи участващи в математическите уравнения в зависимост от логиката на програмата. Уравненията са от вида – кинематични, описващи пространствения израз на геометричните параметри на системата, уравнения описващи процеса на формиране на сигнала и неговото възстановяване, включващо демодулация, компресия по разстояние и азимут чрез крос корелация и бързо преобразуване на Фурие реализирани с вградени в езика функции.

Съдържанието на статията е представено в следната последователност: Във втора глава са изведени геометрични и кинематични уравнения на BGISAR, математическото описание на механизма на формиране на код на баркер модулирани BGISAR сигнали и процедури по възстановяване на изображението. В трета глава се описва надлежно програмната реализация на BGISAR алгоритъм. В четвърта глава е поставен числен експеримент. В пета глава е формирано заключение за ефективността на BGISAR алгоритми.

**2. Геометрични и кинематичен модел на BGISAR сценария и математически модел на BGISAR сигнала с код на Баркер**

Тримерният BGISAR модел с описващите го вектор-координати е илюстриран във Фиг. 1. Целта се представя, като съвкупност от елементарни отражатели в Декартова координатна система OXYZ, като  $\mathbf{R}_{ijk}$  е векторът – положение на  $ijk$ я точков излъчвател.



Вектор – уравнението, описващо кинематиката показана на фиг.1 има следния вид

Разстояние предавател –  $ijk$ та точка – приемник изразено като:

$$R_{ijk}(p) = \frac{|\mathbf{R}_{ijk}^s(p)| + |\mathbf{R}_{ijk}^r(p)|}{2} \tag{1}$$

Фигура 1. Геометрия на BGISAR

Дефиниция на сигналите използвани в системите с инверсна синтезирана апертура и процесът по изобразяване на целта се извършват в последователност от изрази описани по-долу.

Детерминистичната компонента на BGISAR записана в дискретна форма, се описва като суперпозиция на сигналите отразени от  $ijk$ я точков излъчвател:

$$S(p, k) = \sum_{ijk} a_{ijk} \text{rect} \frac{t_{ijk \min}(p) + (k-1)\Delta T - t_{ijk}^r(p)}{T} \times \exp \left\{ -j \left[ \omega(t_{ijk \min}(p) + (k-1)\Delta T - t_{ijk}^r(p)) + \pi b((k-r+1)\Delta T) \right] \right\} \tag{2}$$

Демодулираният BGISAR сигнал има следния вид:

$$a_{ijk}(\hat{p}, \hat{k}) = \sum_{p=1, N} \sum_{k=\hat{k}}^{\hat{k}+K-1} \left[ \hat{S}(p, k) \exp j[\pi b((k - \hat{k} + 1)\Delta T)] \right] \exp \left\{ j\omega \left[ t_{ijk \min}(p) - t_{ijk}^{\hat{k}}(p) \right] \right\}. \tag{3}$$

Възстановителната процедура е както следва:

Фазова корекция:  $\tilde{S}(p, k) = \hat{S}(p, k) \cdot \exp(j\Phi(p))$

Компресия по разстояние с кос косинус корелация

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

Азимутална компресия чрез Фурие преобразуване

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

### 3. Програмна реализация на BGISAR алгоритми

Matlab, като програмен език от високо ниво е удобен инструмент за извършване на обработка на сигнали, математически анализ и моделиране. Многообразието от налични вградени оператори и функции го прави подходящ за описание на процеси в апертурния синтез, дефиниция на геометричния и кинематичния апарат на BGISAR. Matlab обезпечава и детайлно графично представяне на получените данни с възможност за изобразяване на сигнали с голяма динамика на изменение.

В процеса на разработване на програма в Matlab не е наложително да се дефинират библиотеки с функции, използвани в процеса на работа. Всеки програмен сегмент започва с освобождаване на памет и затваряне на предварително отворени фигури. Това се прави с цел осигуряване на достатъчно оперативна памет за съхраняване на изчисленията от настоящата програма и зареждане на информационен файл, съдържащ предварително изчислени резултати или реални данни. Процесът на формиране на BGISAR сигнала започва с дефиниране на основните променливи необходими за работата на програмата:

Вектор – координати, описващи началното положение на радиолокационната приемна и предавателна станции, и положението на масовия център на целта – обект на наблюдение

```
xrs=-20; yrs=-50; zrs=2*10^7; xrt=250; yrt=150; zrt=30;
x00=45; y00=12.5*10^3; z00=3*10^3; num=max(size(Rijk));
```

Параметри на сигнала, включващи дискретни координати по азимут и разстояние, честота на сигнала, период на повторение на импулса и кръгова честота, скорост на светлината, продължителност на кода на Баркер

```
N=256; K=256; f=10^10; Tp=2*10^-3; omega=2*pi*f;
c=3*10^8; Ts=10^-8; deltaT=Ts/K; a=0.5;
```

Вектор-скорости на предавателя и обекта и параметри на масовия център

```
alpha = pi/2; beta = pi/2; gama = abs(acos(sqrt(1-(cos(alpha))^2-(cos(beta))^2)));
alpha1 = pi/4; beta1 = pi/4; gama1 = abs(acos(sqrt(1-(cos(alpha1))^2-
(cos(beta1))^2))); galpha = pi/2; V=10^3; Vs=2.9*10^3;
```

Всички параметри и променливи трябва да бъдат описани преди да бъдат използвани в последващите програми редове. Така се получава не само прегледност в програмата, но и удобство за програмиста. BGISAR кинематиката се състои от векторни уравнения характеризиращи пространственото положение на радиолокационните приемна и предавателна станции и отразяващите точки описващи обекта. Описание на обекта в Matlab се постига с дефиниране на тримерен куб с нулеви стойности съдържащ 25 реда по координата  $x$ , 20 реда по координата  $y$  и 78 реда по координата  $z$  :

```
obj=zeros(25,20,78);
```

Отразяващите точки се дефинират чрез установяване на клетка от куба с

```
obj(1,1,1)=1; obj(1,1,2)=1; obj(2,1,3)=1; obj(2,1,4)=1; obj(2,1,5)=1; obj(3,1,6)=1;
obj(3,1,7)=1; obj(3,1,8)=1; obj(4,1,9)=1; obj(4,1,10)=1; obj(4,1,11)=1;
obj(5,1,12)=1; obj(5,1,13)=1; obj(5,1,14)=1; obj(1,1,15)=1; obj(1,1,16)=1;
obj(2,1,17)=1; obj(2,1,18)=1; obj(2,1,19)=1; obj(3,1,20)=1; obj(3,1,21)=1;
obj(3,1,22)=1; obj(4,1,23)=1; obj(4,1,24)=1; obj(4,1,25)=1; obj(5,1,26)=1;
obj(5,1,27)=1; obj(5,1,28)=1; obj(5,1,29:60)=1; obj(6,1,61)=1; obj(6,1,62)=1;
obj(6,1,63)=1; obj(7,1,65)=1; obj(7,1,66)=1; obj(7,1,67)=1; obj(8,1,68)=1;
obj(8,1,69)=1; obj(8,1,70)=1; obj(9,1,71)=1; obj(9,1,72)=1; obj(9,1,73)=1;
```

координати  $[x, y, z]$  в стойност различна от 0:

Като всеки следващ адрес на клетка се получава чрез добавяне на стъпка на клетката към предходния адрес:

```
deltax=1; deltay=1; deltaz=1;
```

Координатите на всички отразяващи точки се снемат по следния алгоритъм:

```
[x,y,z]=meshgrid(1:100,1:25,1:78); index=find(obj~=0);
xyz(2,:)=kapa_x+deltax.*x(index); xyz(1,:)=kapa_y+deltay.*y(index);
xyz(3,:)=kapa_z+deltaz.*z(index);
```

Получената матрица "xyz" съдържа вектор-координатите на всички отразяващи точки, необходими за изчисляване на кинематичните уравнения.

Програмния фрагмент, в който се извършва дефиниране на координатна система OXYZ в която е разположен BGISAR обектът, цел на наблюдение има следния вид:

```

Vx= V*cos(alpha); Vy=V*cos(beta); Vz= V*cos(gama);
Vxs= Vs*cos(alpha1); Vys=Vs*cos(beta1); Vzs= Vs*cos(gama1);
A0=Vz*(y00-y0)-Vy*(z00-z0); B0=Vx*(z00-z0)-Vz*(x00-x0);
C0=Vy*(x00-x0)-Vx*(y00-y0); D=(A0)^2+(B0)^2+(C0)^2;
Ag=(A0*V*cot(galpa)+C0*Vy-B0*Vz)/D;
Bg=(B0*V*cot(galpa)+A0*Vz-C0*Vx)/D;
Cg=(C0*V*cot(galpa)+B0*Vx-A0*Vy)/D;
D1=(Ag)^2+(Bg)^2+(Cg)^2; psi=atan(-Ag/Bg); theta=acos(Cg/sqrt(D1));
phi=acos((Vx*Bg-Vy*Ag)*sqrt(((Ag)^2+(Bg)^2)*((Vx)^2+(Vy)^2)+(Vz)^2));
a11=cos(psi)*cos(phi)-sin(psi)*cos(theta)*sin(phi);
a12=-cos(psi)*sin(phi)-sin(psi)*cos(theta)*cos(phi);
a13=sin(psi)*sin(theta); a21=sin(phi)*cos(phi)+cos(psi)*cos(theta)*sin(phi);
a22=-sin(psi)*sin(phi)+cos(psi)*cos(theta)*cos(phi);
a23=-cos(psi)*sin(theta); a31=sin(theta)*sin(phi);
a32=sin(theta)*cos(phi); a33=cos(theta);
A rot=[a11 a12 a13; a21 a22 a23; a31 a32 a33];

```

Ориентацията на обекта в пространството се постига чрез използване на Ойлерови трансформационни матрици с елементи описващи трансформацията по координатните оси – x, y и z. Трансформираният вектор - координати се получават чрез матрично умножение на трансформационна матрица A с вектор – координатите xyz:

```
Transf_xyz=delta.*A_rot*xyz;
```

Разстоянието до *ijk*та точка от обекта и пропорционалното и време на закъснение се пресмятат с помощта на тензорния оператор на Кронекер към ротираните вектор-координати на обекта. За да се дефинират вектор – координатите на точковите излъчватели с вектор – линейно изместване се прилага матрично умножение:

```

p_v=(0:N-1);
Xs=kron(x00,ones(num,N))-kron(xrs,ones(num,N))+kron(Vx*(N/2-
p_v)*Tp,ones(num,1))+kron(transf_xyz(1,:),ones(N,1)).'+
+kron(Vxs*(N/2-p_v)*Tp,ones(num,1));
Ys=kron(y00,ones(num,N))-kron(yrs,ones(num,N))+kron(Vy*(N/2-
p_v)*Tp,ones(num,1))+kron(transf_xyz(2,:),ones(N,1)).'+
+kron(Vys*(N/2-p_v)*Tp,ones(num,1));

```

```

Zs=kron(z00,ones(num,N))-kron(zrs,ones(num,N))+kron(Vz*(N/2-
p_v)*Tp,ones(num,1))+kron(transf_xyz(3,:),ones(N,1)).'+
+kron(Vzs*(N/2-p_v)*Tp,ones(num,1));
Xr=kron(xrr,ones(num,N))-kron(x00,ones(num,N))+kron(Vx*(N/2-
p_v)*Tp,ones(num,1))+kron(transf_xyz(1,:),ones(N,1)).';
Yr=kron(yrr,ones(num,N))-kron(y00,ones(num,N))+kron(Vy*(N/2-
p_v)*Tp,ones(num,1))+kron(transf_xyz(2,:),ones(N,1)).';
Zr=kron(zrr,ones(num,N))-kron(z00,ones(num,N))+kron(Vz*(N/2-
p_v)*Tp,ones(num,1))+kron(transf_xyz(3,:),ones(N,1)).';
Rs=sqrt((Xs).^2+(Ys).^2+(Zs).^2);
Rr=sqrt((Xr).^2+(Yr).^2+(Zr).^2);
t=(Rs+Rr)./c;

```

С прилагане на тензорния оператор на Кронекер се пресмятат вектор – координатите за всеки дискретен момент от време –  $p$ . Така се избягват излишни итерации. Това повишава производителността на алгоритъма и оптимално използване на паметта.

Допълнителна оптимизация на паметта се постига чрез предварително заделене на памет за изчисленията, постигната чрез дефиниране на празни вектори и матрици с произволен размер:

```
E1=zeros; func=zeros; rect=zeros;
S1=zeros; Se=zeros; S=zeros(N,K,1);
S2=zeros(N,K,1);
```

Необходими параметри за формиране на сигнала са Баркер кодовата последователност и дължина на обекта в дискретни координати:

```
Barkercode=[0 0 0 0 1 1 0 0 1 0 1 0];
Nx=ceil((max(max(t))-min(min(t)))/deltaT);
```

Програмния фрагмент формиращ BGISAR сигнала с код на Баркер модулация представлява циклична последователност по отношение на дискретните координати по разстояние и азимут. Фрагмента последователно пресмята фазовата стойност на селектиращата правоъгълна функция, както и комплексната амплитуда и фаза на Баркер фазово модулирания сигнал. Фрагментът завършва с рекурентно сумиране по дискретните координати:

```
for q=1:num
  for p=1:N
    for k=1:K
      E1(p,k,q)=min(t(:,p))+(k-1)*deltaT-t(q,p);
      func(p,k,q)=E1(p,k,q)/T;
      if func(p,k,q)>=0&&func(p,k,q)<1
        rect(p,k,q)=1;
      else
        rect(p,k,q)=0;
      end
      S1(p,k,q)=rect(p,k,q)*exp(1j*(omega*E1(p,k,q)+
      +Pi*Barkercode(k-(r)+1))); S(p,k,1)=S(p,k,1)+S1(p,k,q);
    end
  end
end
```

Фрагментът извършващ процедурата по компенсация на движението на целта е изграден, чрез последователно повишаване на фазово коригиращия коефициент и поелементно умножение с BGISAR сигнала. Той започва с дефиниране на стъпката на изменение на коефициента  $a_2$  и циклично нарастване с броячен цикъл:

```
a21=0; delta2=0.5*10^0;
for a2=1:10000
```

Следва изчисляване на коефициента и умножаване за всички дискретни координати по азимут за всяка дискретна координата по разстояние, реализирано с броячен цикъл:

```

a21=a21+delta2;
F2=exp(1j.*(a21.*((1:128).*Tp).^2));
for k = 1:K;
    Sdem_F2(:,k) = S(:,k) .*F2;
end

```

След умножението с фокусиращия коефициент следва възстановяване на изображението включващо умножаване с комплексно спрегнат излъчен сигнал, крос корелация – извършващи демодулация и компресия по разстояние и бързо преобразуване на фурие извърващо компресия по азимут:

```

for k=1:Nx
    if Barcercode(k)==1
        Sop(k)=exp(j*(omega*(k-1)*deltaT+pi));
    else
        Sop(k)=exp(j*(omega*(k-1)*deltaT));
    end
end
for p=1:N
    Skor(p,:)=xcorr(S(p,:),Sop);
end
fft12=abs(fft(Skor)); Sfoc2=fft12./max(max(fft12));

```

Процедурата завършва с изчисляване на оценъчната функция и нейното изменение:

```

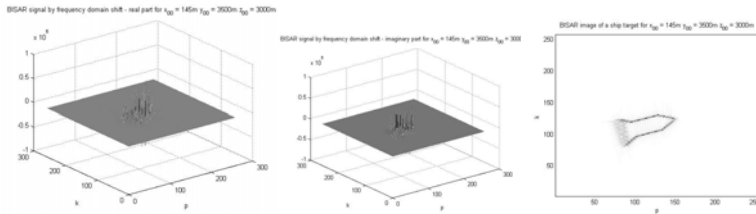
Entropy2(a2) = -sum(sum(Entropylog2));
if a2>1
    dif_entropy2(a2)=diff([Entropy2(a2-1);
else
    dif_entropy2(a2)=NaN;
end
end

```

#### 4. Числен експеримент

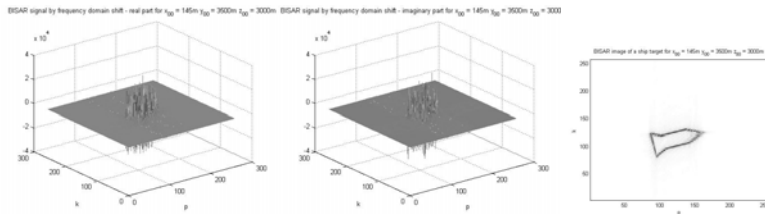
С цел доказателство на концепцията на BGISAR геометрични и кинематични характеристики, формиране на сигнала и възстановяване на изображението е проведен числен експеримент. Допуска се, че предавателната станция и целта, обект на наблюдение се движат в Декартовата координатна система *Oxyz*. Предавателят се описва с вектор-координати:  $x^s = -20$  м;  $y^s = -50$  м;  $z^s = 2 \cdot 10^7$  м. и модул на вектор – линейно изместване  $V^s = 2900$  м/с. Вектор-координатите на приемника са:  $x^r = 250$  м;  $y^r = 150$  м;  $z^r = 30$  м. Целта, обект на наблюдение се описва със следните параметри: модул на вектора – линейно изместване  $V^r = 1000$  м/с;  $\alpha = \pi/2$ ;  $\beta = \pi/2$ ;  $\gamma = 0$ . Вектор-координатите на мажовия център на обекта в момента  $p = N/2$ :  $x_{00}(0) = 45$  м;  $y_{00}(0) = (12.5)$  км;  $z_{00}(0) = 3$  км. Параметри, формиращи BGISAR фазово модулирания с код на Баркер сигнал са: дължина на вълната  $\lambda = 3 \cdot 10^{-2}$  м, период на повторение на импулса  $T_p = 2 \cdot 10^{-3}$  с, продължителност на кодовата последователност на Баркер  $T = 10^{-8}$  с, брой на отчетите по разстояние

$K = 256$ , носеща честота  $f = 10^{10}$  Хц., период на вземане на отчет от Баркер сигнала  $\Delta T = T / K = 1.56 \cdot 10^{-8}$  с, брой излъчени импулси  $N = 256$ . Решетката, в която е разположен обектът е с размери  $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z = 1$  м. BGISAR сигналът, компресиранят по разстояние и азимут BGISAR сигнал за  $x_{00}(0) = 45$  м.;  $y_{00}(0) = 12.5$  км.;  $z_{00}(0) = 3$  км. е илюстриран на фигура 4 а и б Възстановеното разфокусирано изображение е илюстрирано на фиг.4 (с)

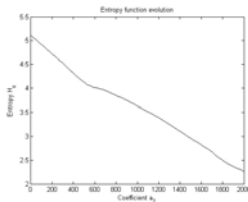


**Фигура 4.** BGISAR сигнал след азимутална компресия и спектрално отместване реална (а) и (б) имагенерна част и разфокусирано BGISAR изображение (с)

Във фигура 4 е описан модела на BGISAR сигнала и резултата от възстановителната процедура – фокусирано изображение. Извършена е апроксимация на фокусиращата функция чрез нейната квадратична компонента  $a_2$ :



**Фигура 5.** Фокусиран и компресиран по азимут BGISAR сигнал: реална (а) и (б) имагенерна част и разфокусирано BGISAR изображение (с).



**Фигура 6.** Процедура по пресмятане на Ентропийна функция за коефициент  $a_2$ .

Във фиг. 6 са изобразени резултатите получени от пресмятане на оценяваща изображението етропийна функция за коефициент  $a_2$ . всяка стойност на оценъчната функция се получава за конкретен коефициента  $a_2$  изменящ се със стъпка  $\Delta = 1$ , като минимална стойност на ентропията  $H_s = 2.31$  се получава за коефициент  $a_2 = 2000$ . Резултатът от действието на процедурата се наблюдава във фиг. 5 (с).

### 5. Заключение

В настоящата работа е представен алгоритъм и програма за моделиране на процеса на получаване на BGISAR сигнали, отразени от обект със сложна геометрична форма, представен като съвкупност от отразяващи точки. Радиолокационната система и обекта на наблюдение, дефиниран в координатна система  $OXYZ$  се намират в обща координатна система. Изведени са основните описващи BGISAR геометрията кинематични векторни уравнения на инверсията апертурен синтез за визуализация на въздушна цел, аналитичният израз на сигнала, показващ BGISAR модел с код на Баркер модулация е дефиниран. Специфичен елемент от модела е индексът на разделилния елемент. Той описва дискретната координата по разстояние на точката, от която е получен първия отразен сигнал. Крайната продължителност на сигналите от отделните излъчватели се дефинира с правоъгълна функция, която определя присъствието на всеки един в сумарния отразен сигнал от обекта. Дадено е цялостно описание на ключови фрагменти от програмата, реализирана в среда на Matlab.

Възможност за облекчение на изследователския процес е използване на симулационни данни, което дава възможност за бързо и коректно получаване на резултати с практическо значение. Така се подлагат на проверка множество нови концепции без необходимостта от налична апаратура.

### Благодарности

Тази разработка е подкрепена финансово от Проект No: BG 051 PO 001-3.3.04/13, "Подкрепа на творческото развитие на докторанти, пост-докторанти и млади учени в областта на компютърните науки", финансиран от ЕВРОПЕЙСКИ СОЦИАЛЕН ФОНД, Оперативна програма "Развитие на човешките ресурси" 2007-2013 и проект НАТО ESP. EAP. CLG. 983876.

*Настоящата работа е разработена под ръководството на проф. А. Лазаров от Бургаския свободен университет*

### Литература:

1. A. Moccia, Rufino, G., D'Errico, M., Alberti, G., et. al. "BISSAT: A bistatic SAR for Earth observation", *Proc. of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'02)*, Vol. 5, June 24-28, 2002, pp. 2628-2630.
2. Moccia, A., Salzillo, G., D'Errico, M., Rufino, G., Alberti, G., "Performance of bistatic synthetic aperture radar", *IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS VOL. 41, NO. 4 OCTOBER 2005*, pp. 1383 – 1395
3. Lazarov, A., Kostadinov, T., ISAR linear frequency modulated signals program implementation in matlab environment, Veliko Tarnovo, Bulgaria 25-27 may 2011
4. Lazarov, A., Kabakchiev, C., Gashinova, M., Kostadinov, T., Ultra wide band bistatic forward scattering inverse synthetic aperture radar imaging, International Radar Symposium, Leipzig, Germany 7-9 September 2011
5. Lazarov, A., Kabakchiev, C., Rohling, H., Kostadinov, T., Bistatic Generalized ISAR concept with GPS waveform, International Radar Symposium, Leipzig, Germany 7-9 September 2011
6. J. H. G. Ender, I. Walterscheid, and A. R. Brenner, "New aspects of bistatic SAR: Processing and experiments." *2004 Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, vol. 3, Anchorage, AK, Sept. 20—24, 2004, pp. 1758-1762.
7. D. D'Aria, A. M. Guarnieri, and F. Rocca, "Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, no. 7, 2004, pp. 1362-1376.