

СИНТЕЗ НА АЛГОРИТЪМ ЗА РАБОТА НА РАДАР С КОМБИНИРАНО ИЗЛЪЧВАНЕ И ПОДОБРЕНИ ПРАМЕТРИ НА ССДЦ.

Маг. инж. София С. Узунова
Доц. д-р инж. Михаил П. Желязов

Факултет по транспорта, Технически Университет – София, България
suzunova@tu-sofia.bg
Факултет по транспорта, Технически Университет – София, България
mikael@tu-sofia.bg

SYNTHESIS OF AN ALGORITHM FOR THE OPERATION OF A RADAR WITH COMBINED RADIATION AND IMPROVED PARAMETERS OF THE MOVING TARGET SELECTION SYSTEM.

Sofia S. Uzunova
Mihail P. Zhelyazov

Faculty of Transport, Technical University – Sofia, Bulgaria, suzunova@tu-sofia.bg
Faculty of Transport, Technical University – Sofia, Bulgaria, mikael@tu-sofia.bg

Abstract:

The report synthesizes an algorithm for the operation of a radar with continuous emission and linear frequency modulation (LFM), proposes a Matlab code for the operation of the moving target selection system, based on the preperiodic subtraction method, and offers improved parameters for determining the distance to moving objects on the earth's surface. The results of the experimental study of the radar's operation on ground moving targets are shown.

Keywords: linear frequency modulation, preperiodic subtraction method, ground moving targets, moving target selection system

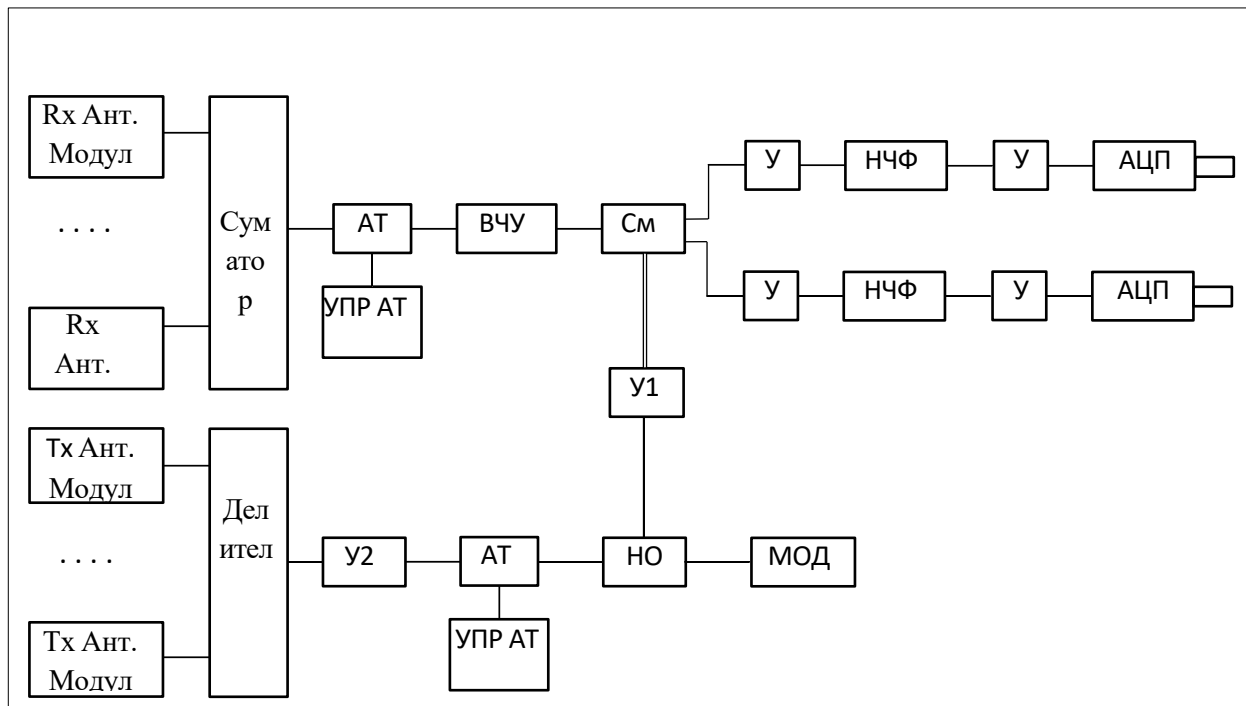
1. ВЪВЕДЕНИЕ

Във връзка с актуалното в момента придвижване на групи хора през гранични райони, нараства интереса към радарните системи за откриване и проследяване на хора върху местността. Това е особен вид РЛС, отговарящи на определени изисквания. Те не трябва да се бъркат с въздушно базираните (авиационни) радари за откриване на наземни обекти, каквито са радарите със синтезирана апертура, радарите за откриване и целеуказване на наземни обекти и някои навигационни радари [1,2].

Изискванията към наземно базираните РЛС за откриване на подвижни наземни обекти са: РЛС трябва да открива обекти с ЕОП от 0.1 m^2 ; трябва да притежава висока разделителна способност по разстояние; да има ниска мощност на предавателя; трябва да са преносими и с лесен монтаж; изисквания за минимални габарити и тегло, което изисква по-висока честота на работа; захранването да е от акумулатори - 12 или 24 волта; скорост на въртене на антената - $20 \div 30$ об/мин; да осигурява секторен режим на работа; да е с непрекъснато излъчване или с ъглова модулация, като най-често се прилага линейно честотната модулация (ЛЧМ).

Радари от този вид, работещи на честоти под 3 GHz на практика няма. Обикновено се използва диапазон около 9 GHz и 15 GHz . Напоследък има и в диапазони около 24 GHz , но там влиянието на атмосферните образувания (мъгла, дъжд, сняг, и др.) е много по осезаемо.

От предварително извършени проучвания и анализи е направен извода, че най-успешно ще е построяването на радар с непрекъснато излъчване и ЛЧМ, като сканирането е комбинирано – механично и електронно, блоковата схема, на който е показана на фиг.1.[3]

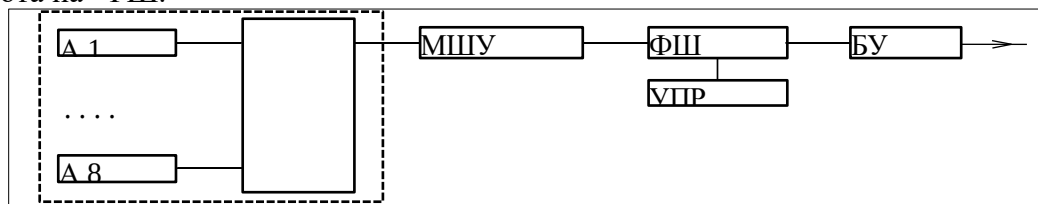


Фигура 1. Блокова схема на радар с непрекъснато излъчване и ЛЧМ.

На фиг. 1 е показана блоковата схема на РЛС до изхода на ADC (аналогово – цифров преобразувател). След това следва блока за обработка на информацията и комуникационната част, която предава информацията към PC .

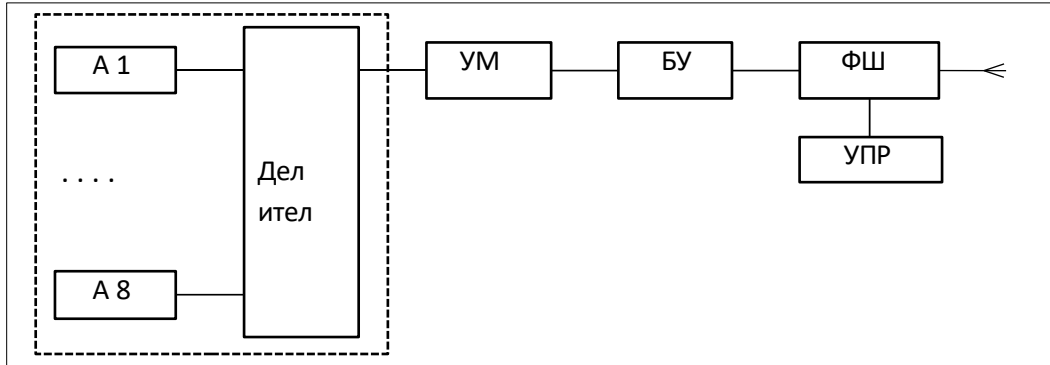
II. ИЗЛОЖЕНИЕ

На фиг.1 с R_x Ант. модул е обозначен приемем антенен модул, а схемата на му е показана на фиг. 2. Той включва в себе си антенен елемент (състоящ се от антена и суматор), малощумящ усилвател (МШУ), фазов шифтър (ФС) – устройство, което променя фазата на входните му сигнали дискретно, буферен усилвател (БУ), компенсиращ затихването във ФС и управляващо устройство, с което се задава режима на работа на ФС.



Фиг. 2 Блок схема на приемен антенен модул.

С T_x Ант. модул е обозначен предавателен антенен модул, а на фиг. 3 е показана неговата блокова схема. Тя включва същия антенен елемент като в приемния модул, усилвател на мощност, БУ, ФШ и управление. Усилвателят на мощност може да отдаде $0.25 W T_x$ при непрекъснат режим. Това дава възможност без значително влошаване на параметрите броя на T_x модулите да се намали два пъти, т.е. до 16, докато R_x модулите да са 32.



Фиг. 3. Блок схема на предавателен антенен модул.

В схемата има два делителя/суматора на мощност с 16 и съответно 32 входа. Това са пасивни схеми на базата на суматори на Уилкинсън (Wilkinson).

АТ е управляем атенюатор на входа на приемника. с негова помощ се установява такъв режим на работа на приемника, че влизането в режим на ограничение да се избегне. Управлението на АТ става посредством управленчески блок (УПР АТ) от матрицата за обработка на информацията съобразно получените данни от АЦП.

ВЧУ е високочестотен усилвател, който допълнително усилва сигналите от обектите.

См е двуканален балансен смесител.[4] В него става смесване на отразените от обектите сигнали с текущия сигнал за излъчване. Смесителите с квадратична характеристика са идеални елементи, тъй като при тях се получават най-малък брой нежелани честоти. Ако елементът има предавателна характеристика

$$i(t) = au_i(t) + b[u_i(t)]^2$$

(1)

а входния сигнал е

$$u_i(t) = U_1 \cos \omega_1(t) + U_2 \cos \omega_2(t),$$

(2)

то за изходния ток се получава

$$i_0(t) = a U_1 \cos \omega_1(t) + a U_2 \cos \omega_2(t) + b U_1^2 \cos^2 \omega_1 t + b U_2^2 \cos^2 \omega_2 t + 2 b U_1 U_2 \cos$$

(3)

Напреженията, изразени чрез първите два члена на (3), не представляват интерес за изясняване действието на смесителя, защото при реален смесител е възможно тяхното филтриране. След използване на тригонометричното равенство

$$b U_1^2 \cos^2 \omega_1 t = b/2 U_1^2 (1 + \cos 2 \omega_1 t)$$

(4)

се вижда, че третият и четвъртият член са постояннотокова съставка и втори хармоници на входния сигнал. Последният член на (3), наричан член на продукта на смесването, съдържа желания изходен сигнал, т.е.

$$(5) \quad 2bU_1 U_2 \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t = bU_1 U_2 [\cos(\omega_1 - \omega_2)t + \cos(\omega_1 + \omega_2)t]$$

Амплитудите на съставките със сумарна и разликова честота са пропорционални на произведеното от амплитудите U_1 и U_2 на входния сигнал.

На изходите I и Q съответно се получават разликови сигнали от тях, като на изхода на I

$$f_I = f_{ex} - f_T, \quad (6)$$

а на изхода
на Q

$$f_Q = f_{ex} - f_T \times (+90^\circ). \quad (7)$$

U – усилватели с малък шум и лента на пропускане значително по-ниска от тази на ВЧУ (до $50 \div 100 \text{ MHz}$).

НЧФ – нискочестотен филтър, който ограничава високочестотните съставни от смесителя.

U_1 – усилвател с параметри подобни на предходния усилвател, но с по-голям K_u и изход, съгласуван с входа на АЦП.

АЦП – аналогово – цифров преобразувател, избора на който трябва да се ръководи от две изисквания – честота на семплиране и разрядност. Честотата на семплиране в примера, който се разгледа по-горе бе $32\,768 \text{ MHz}$, т. е. трябва да се избере АЦП с честота на семплиране 40 MHz или повече.

Обикновено се използват 12 разрядни АЦП. Възможно е ползването и на 14 разрядни АЦП, но това увеличава обема обработвана информация и изисква по-големи ресурси за обработка.

УС – усилвател за съгласуване. Той усилва сигнала от модулятора до необходимото ниво за нормална работа на смесителя.

МОД – модулатор. Той изработва пилообразния сигнал, който се излъчва. Обикновено това е специализиран синтезатор на честоти, на който се задават всички параметри ($f_{нич}$, $f_{кр}$, $f_{ст}$, брой стъпки, изходно ниво и др.).

НО – насочен отклонител, който дели сигнала от модулятора на две (НО – 3 dB).

АТ – атенюатор (подобен на предходния). Той намалява сигнала от модулятора при нужда (например близък обект, който връща много силен сигнал). Управлява се от РС през блока за обработка на информацията.

U_2 – усилвател. Той повишава мощността на сигнала от модулятора така, че след делителя на мощност (където се разпределя на 16 изхода) нивото да е достатъчно голямо (около 20 dBm).

Ехото, постъпващо за обработка може да се състои от няколко от изброените по-долу компоненти [5,6]:

- отражения от обекти, представляващи интерес (полезен сигнал);
- отражения, наподобяващи полезен сигнал;
- отражения от пространствени обекти – с твърда повърхност или дифузни;
- отражения от земната повърхност (фон) – за наземни радары;
- дискретни радио излъчвания от други източници – случайни или преднамерени;
- непрекъснати радио излъчвания от други източници – случайни или преднамерени;

- отражения и радио излъчвания от други източници, приети по странични листа на диаграмата на антената на радара;

- шумове – от разпространението на радио вълните през атмосферата, от отразяващия обект, от апаратурата на радара.

Обектите, представляващи интерес по-нататък ще се наричат полезни обекти, а отраженията от тях – полезен сигнал. За наземните радари полезни обекти могат да бъдат хора, моторни или задвижвани по друг начин (жива сила, вятър) превозни средства от всякакво естество, и други подобни. За въздушните радари полезни обекти могат да бъдат всякакви летателни средства, включително аеростати. Характерно за полезните обекти е това, че като правило те са точкови, т.е. с малки размери, и могат да се движат, т.е. да променят своите пространствени координати включително и по височина.

Координатите на неподвижните или на квази неподвижните обекти не се променят или се променят достатъчно рядко. Това позволява тези координати да се придобиват по други начини (спътниково наблюдение, топографски методи) и да се ползват продължително време без да се налага непрекъснато радарно наблюдение. Контролът за местоположението на тези обекти може да се извършва периодично, но не постоянно. Следователно може да се приеме, че полезните обекти следва да са подвижни. Възможността за придвижване, от своя страна, налага ограничения на техните размери. Под квази неподвижни ще разбираме обекти, времето за преместване на които превишава времето за определяне на техните координати – например масивни метални конструкции за временно използване.

Отраженията, наподобяващи полезен сигнал, като правило са от точкови неподвижни обекти. Такива могат да бъдат отделни неголеми сгради и съоръжения, стълбове, промишлени комини, отделни дървета и храсти. Те не могат да променят своите координати, но могат да извършват собствени движения като клоните на дърветата при вятър. [6] За въздушните радари подобни отражение могат да бъдат предизвикани и от специфични атмосферни явления.

За наземните радари примери за пространствени обекти с твърда повърхност могат да бъдат произволни сгради, съоръжения, природни образувания (скали и други). Дифузни такива могат да бъдат горски масиви. За въздушните радари примери за дифузни пространствени обекти са плътните облаци. Общото за пространствените обекти е това, че техните размери многократно превишават размерите на полезните обекти и, по тази причина, са неподвижни или слабо подвижни.

Отраженията от земната повърхност са характерни само за наземните радари и представляват непрекъснат неравномерен фон.

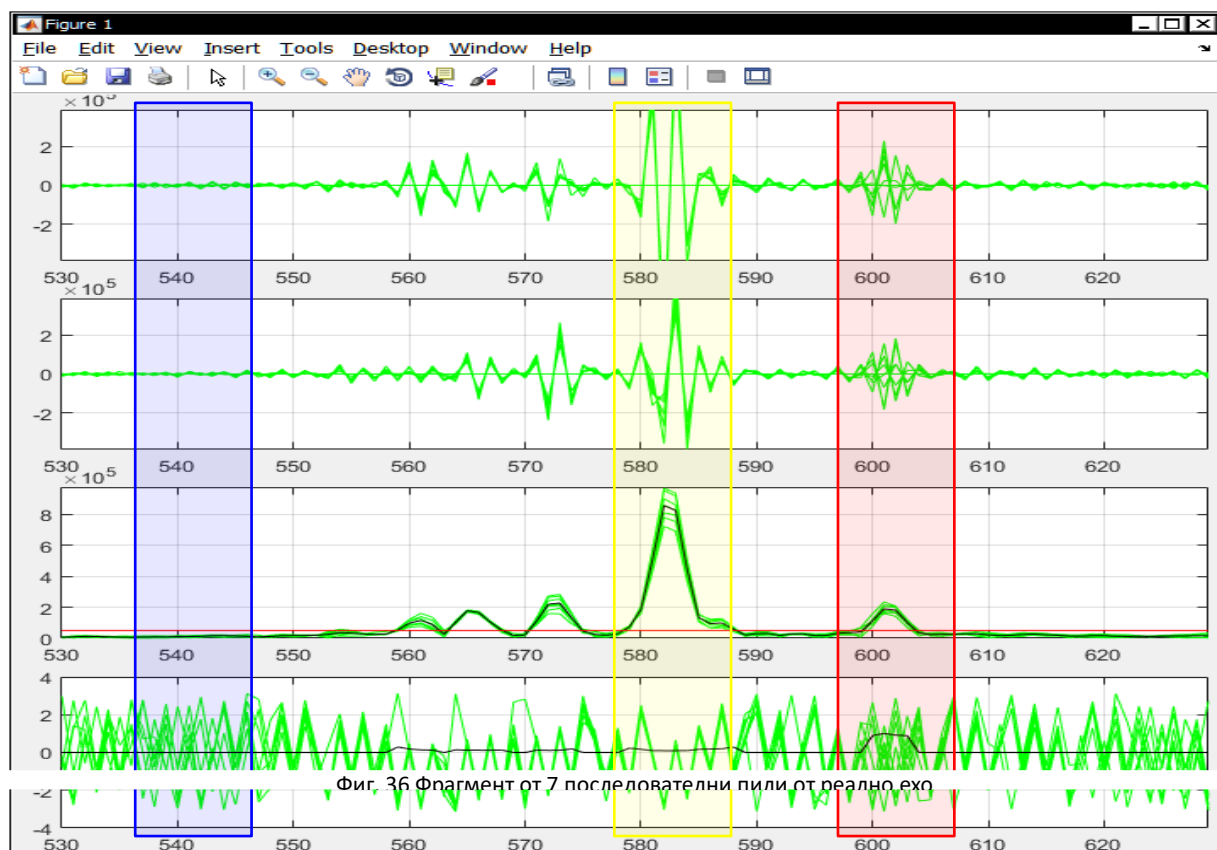
Дискретните излъчвания от други източници, които попадат в честотния диапазон на радара, се приемат като полезен сигнал или като наподобяващи полезен сигнал.

Шумовете от разпространението на радио вълните през атмосферата и от апаратурата на радара, които попадат в честотния диапазон на радара, се възприемат като непрекъснат равномерен фон със сравнително ниска интензивност. За разлика от тях, непрекъснатите радио излъчвания от други източници могат да обхващат само отделни сектори по азимут и са с по-висока интензивност. Шумовете от отразяващия обект се наслагват (векторна сума) с отражението от обекта.

Различните компоненти на ехо-сигнала изискват различни подходи за тяхната обработка, която се свежда до засилване на полезния сигнал на фона на потискането на всички останали.

Отраженията и излъчванията от други източници ще се нарича „сигнал” или „общ сигнал”. От това следва, че радарното ехо се състои от сигнал и шум, а полезния сигнал е част от общия. [7] В този контекст може да се приеме, че шумът се проявява като допълнителна модулация на сигнала.

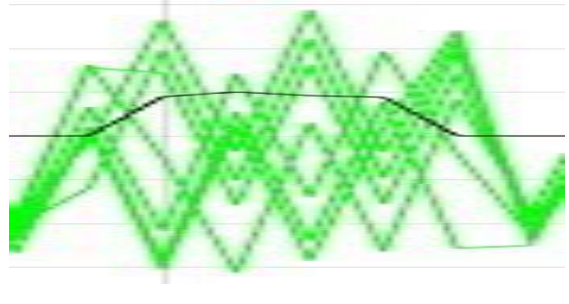
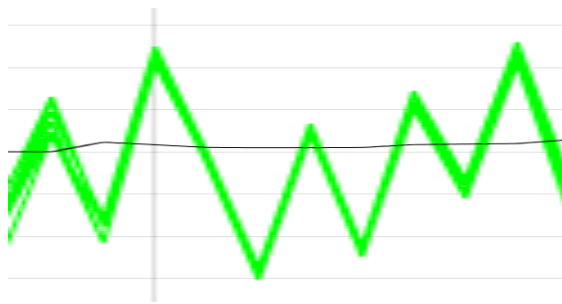
На фиг. 4 е показан фрагмент от 7 последователни „пили“ от реален ехо сигнал на радар с непрекъснато излъчване след трансформация на Фурие. Горните две графики показват реалната и имагинерната стойност на получения спектър на разликвата честота (това е честотата от изхода на смесителя). На третата графика са показани амплитудите на отделните „пили“ в зелено и тяхната средна аритметична стойност (САС) в черно. Червената линия показва осредненото ниво на сигнала. Всичко над нея се приема за сигнал. Четвъртата графика показва ъгъла, който дава функцията аркус-



Фиг. 4. Фрагмент от 7 последователни „пили“ от реално ехо на радар с непрекъснато излъчване след трансформация на Фурие.

тангенс от отношението на имагинерната към реалната стойност на ехото за всяка „пила“ поотделно в зелено и тяхното „средно квадратично отклонение“ (СКО) в черно. Този ъгъл показва текущата стойност на фазата на „разликвата честота“ (по-нататък – само „фаза“) в зависимост от разстоянието до отразяващия обект. При неподвижните обекти разстоянието до тях е константа, фазата се запазва еднаква в последователните „пили“ и, следователно, СКО е малко. Разстоянието до подвижните обекти се променя в зависимост от тяхната радиална скорост спрямо радара, променя се и фазата, което води до по-голямо СКО. СКО на шума се приема за равно на нула. В червения правоъгълник е показано ехо от подвижен обект, в жълтия – от неподвижен обект, в синия – от шум.

От графиките се вижда, че СКО на подвижния обект е по-голямо от това на неподвижния, което се използва за селектиране на полезен сигнал.



Фиг. 5. Графики от ехо-сигнала при кръгов обзор

Кодът на Matlab за тази фигура е даден по-долу

```
m2Ampl = sqrt(m2Real(v1dp,:).^2 + m2Imag(v1dp,:).^2); изчислява
амплитудата на ехото;

m2RPhi = atan2(m2Imag(v1dp,:), m2Real(v1dp,:)); изчислява фазата на
ехото;

v1MeanAmpl = mean(m2Ampl);

изчислява средно аритметичната стойност на амплитудата на ехото;

v1SDevRPhi = std(abs(m2RPhi));

изчислява СКО на фазата на ехото;

s0lsig = mean(v1MeanAmpl) * s0kls; % noise + signal

изчислява средно аритметичната стойност на амплитудата на ехото
като начална оценка на нивото на сигнала – всичко под нея се приема за шум;

v1temp = v1MeanAmpl; v1temp(v1temp > s0lsig) = []; s0lsig =
mean(v1temp) * s0kls; % noise

изчислява средно аритметичната стойност на амплитудата на шума –
всичко над нея се приема за сигнал;

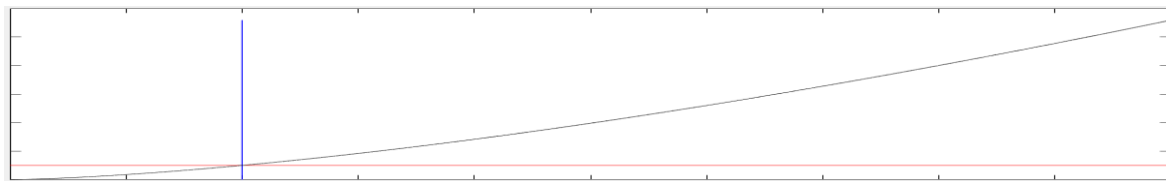
v1temp = v1MeanAmpl; v1temp(v1temp < s0lsig) = []; s0lsig =
mean(v1temp); % signal

изчислява осреднената амплитудата на сигнала;
v1SDevRPhi(v1MeanAmpl < s0lsig) = 0;

приравнява стойността на СКО на шума на нула;
```

Етапите, през които преминава обработката на ехото включват: аналогова обработка в приемния тракт на радара; преобразуване на ехото в цифров вид; цифрова обработка в „FPGA” модула на радара; цифрова обработка в компютър. По-нататък са разгледани стъпките на обработка на ехото в радара.

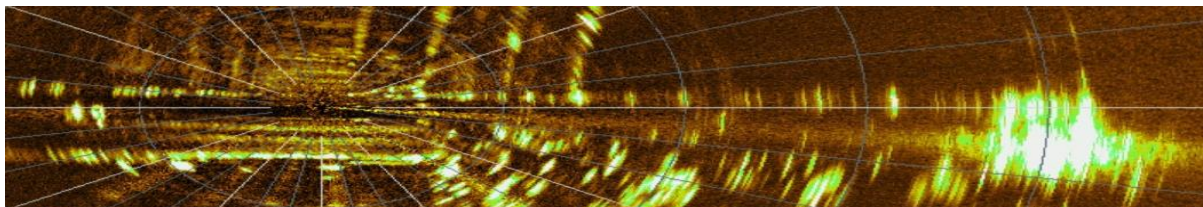
От основното уравнение на радиолокацията следва, че силата на отразения сигнал намалява с разстоянието до отразяващия обект. Това налага нивото на сигнала да бъде не константа, а функция от разстоянието. Алтернативен подход може да бъде нормиране на ехото, така че нивото на сигнала да бъде константа, т.е. амплитудата от обекти с еднаква отразяваща повърхност да е еднаква и да не зависи от разстоянието до тях. За целта се въвежда нормираща функция по разстояние, с която се умножава ехото. Вариант на такава функция е посочена на фиг. 6.



Фиг. 6. Нормираща функция по разстояние

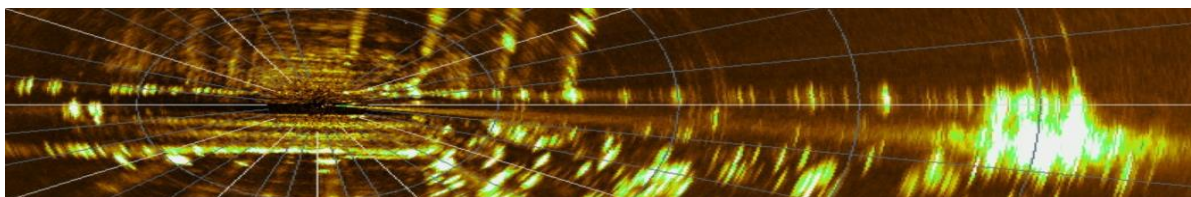
По оста X е разстоянието до обекта, а по Y – стойността на нормиращата функция, показана с графиката в черен цвят. Функцията е степенна от вида: $Y(x) = K (x / X_0)^P$. С червен цвят е показана стойността на коефициента K , а със син – на константата X_0 . Степенният показател P следва да бъде по-голям от нула – $P \geq 0$. При $P = 0$ се получава $Y(x) = K$, т.е. ехото се умножава на константа, която не зависи от разстоянието. Последното може да се прилага, когато нормирането е извършено предварително при аналоговата обработка на ехото.

От фигурата се вижда, че при $K=1$ така избраната нормираща функция потиска ехото на разстояние до X_0 и го усилюва на по-големи разстояния. Параметрите K , X_0 , P могат да се изчисляват с използване на статистически методи за оценка на ехото и/или да се задават от оператор. Изчисляването на амплитудата и фазата на ехото е показано по-горе.



Фиг. 7. Фрагмент от радарна картина на изхода от трансформацията на Фурие след аналогово нормиране на ехото

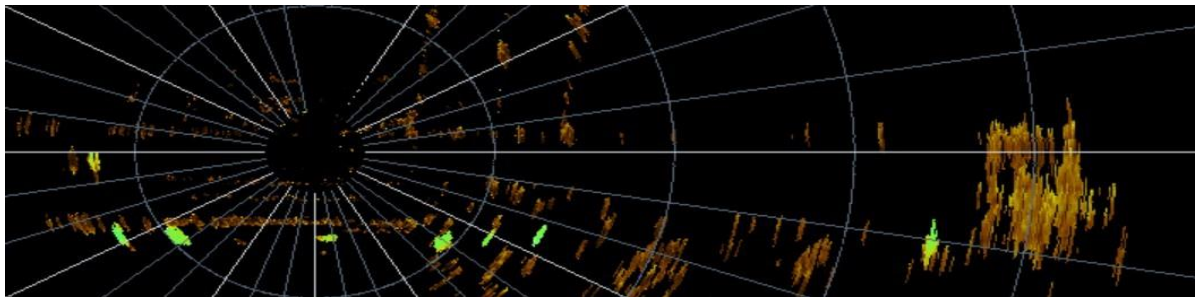
На фиг.7. е показан фрагмент от радарна картина на изхода от трансформацията на Фурие след аналогово нормиране на ехото. Вижда се, че интензивността на отраженията не зависи от разстоянието. Яркият засвет вдясно е пример за дифузен обект – в случая горски масив.



Фиг. 8. Амплитуден канал за обработка на ехото

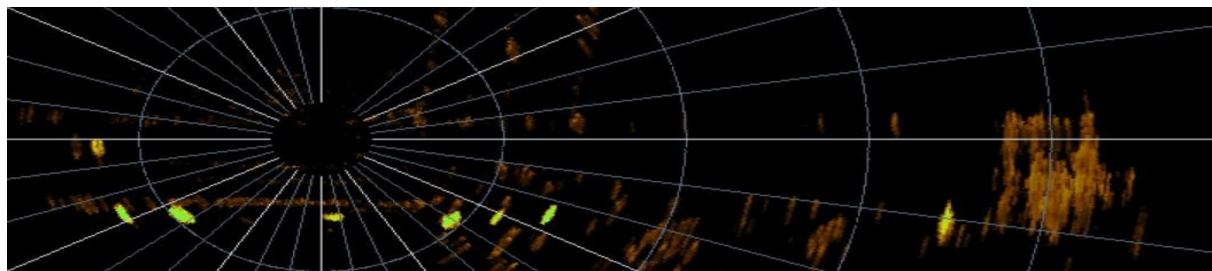
На Фиг. 8. е показана радарна картина на САС на амплитудата на ехото (амплитуден канал за обработка на ехото на радара). На нейна основа се изчислява нивото на сигнал за всяка „пила” поотделно. Всичко, което е под тази стойност се приема за шум и се нулира, т.е. отпада от по-нататъшна обработка.

Фиг. 9. показва съответната радарна картина на СКО на фазата на ехото (фазов канал за обработка на ехото на радара).



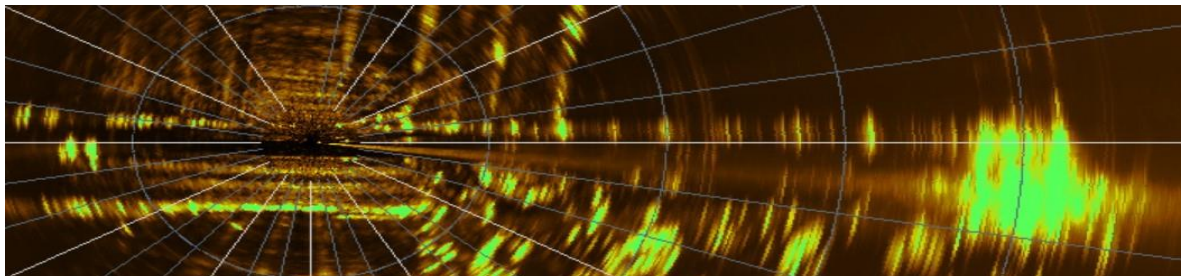
Фиг. 9 Фазов канал за обработка на ехото

Ярките сигнали в зелен цвят са от подвижни обекти. Вижда се съществено намаляване на силата на сигнала от фона.



Фиг. 10. Фазов канал за обработка на ехото с филтър.

Фиг.10. показва същата радарна картина на фазовия канал, но след прилагане на филтър за изглаждане на ехото. Вижда се, че филтърът подтиска интензивността на сигнала от фона в по-голяма степен в сравнение с интензивността на полезния сигнал.

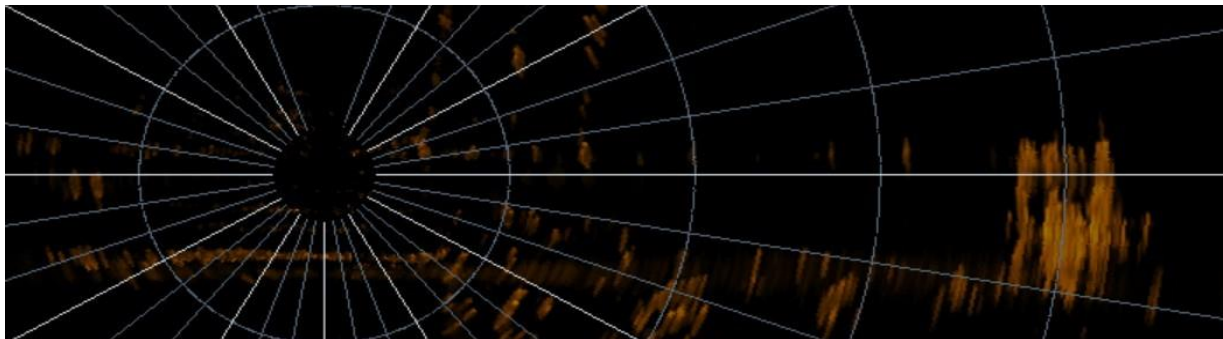


Фиг. 11. Карта на фона за амплитудния канал на радара.

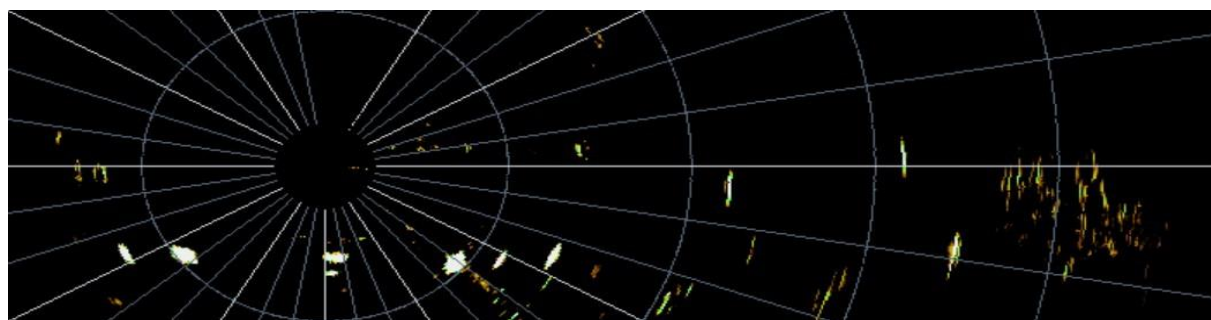
Фиг. 11 и фиг. 12 показват картите на фона, съответно за амплитудния и за фазовия канал на радара. Картите се формират посредством итеративно осредняване на съответните сигнали от предишни обзори (обороти на антената) по формулата :

$$„MAP_new = K * MAP_old + (1 - K) * Signal“$$

поотделно и независимо за всеки отчет по разстояние и по азимут, където „0 < K < 1“. Вижда се, че картите съдържат отражения само от неподвижни обекти (фона).



Фиг. 12. Карта на фона за фазовия канал на радара.



Фиг. 13. Ехо сигнал, който се получава след изваждане на фона от полученото ехо, съответно за амплитудния канал.



Фиг. 14. Ехо сигнал, който се получава след изваждане на фона от полученото ехо, съответно за фазовия канал.

На фиг.13 и фиг.14 са показани ехо синалите, които се получават след изваждане на фона от полученото ехо, съответно за амплитудния и за фазовия канал. Отрицателните стойности се приравняват на нула.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

Синтезиран е алгоритъм за работа на радар с непрекъснато излъчване и линейна честотна модулация (ЛЧМ), предложен и разработен е Matlab код за работа на системата за селекция на движещи се цели, базиран на метода на презпериодно

изваждане, и предлага подобрени параметри за определяне на разстоянието до движещи се обекти върху земната повърхност. Показани са резултатите от експерименталното изследване на работата на радара върху наземни движещи се цели.

БЛАГОДАРНОСТИ.

Научните изследвания и резултатите в настоящата публикация са финансирани от проект по НИС на ТУ – София - 2024 г „В помощ на докторанта“ № 242ПД0018-04.

Литература

1. Кузьмин С. З. *Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации.* — М.: Радио и связь, 1986. — 352 с: ил.
2. Лихарев В. А. *Цифровые методы и устройства в радиолокации.* — М: Сов. Радио, 1973. — 456 с.
3. Лозовский И. Ф. *Защита РЛС обзора от точечных помех* : монография / И. Ф. Лозовский. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. — 242 с.
4. Максимов М. В. *Защита от радиопомех.* Под ред.. Максимова М. В., “Сов. радио”, 1976, 496 с.
5. Перевезенцев Л. Т., Огарков В. Н. *Радиолокационные системы аэропортов:* Учеб. Для вузов гражданской авиации.— 2-е изд., перераб. И доп.— М.: Транспорт, 1991. — 360 с.
6. *Радиолокационные устройства и системы* / Под ред. А. С. Виницкого. — М.: Сов. радио, 1978, 528 с., с ил.
7. *Справочник по радиолокации.* Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк, 1970: Пер. С англ. (в четырех томах) / Под общей ред. К. Н. Трофимова; Том 3.