

Зенитна ракетна система С-200 ВЭ “Вега” (SA-5 “Gammon”) Принцип на построение



Зенитна Ракетна Система С-200 ВЭ “Вега” (SA-5 “Gammon”)

1. Принципи на построение на ЗРС С-200 ВЭ “Вега”

1.1 Назначение на ЗРС С-200ВЭ. Принцип на работа.

Зенитната ракетната система ЗРС С-200ВЭ е система за далечно действие. Тя е предназначена за унищожаване чрез зенитни управляеми ракети на противниковите средства за въздушно нападение. Първостепенна задача на стрелбата със ЗРС С-200ВЭ е унищожаването на максимално разстояние на самолети-разузнавачи, самолети за управление, поставачи на смущения и носители на авиационни ракети от класа “въздух - земя”, а също и на височинни скоростни самолети и самолети с малка ефективна отразяваща повърхност (ЕОП).

Основните тактически характеристики на ЗРС С-200ВЭ са следните. Системата е многоканална по цел, т.е. може да унищожава едновременно няколко цели. За унищожаването на целта срещу нея се изстрелват от 2 до 3 ракети. Вероятността за поражение на целта с една ракета е 0,72-0,99. Поражението на целта се осъществява в област от пространството, ограничено по височина, разстояние и курсови ъгли чрез срещата на ракетата с целта. Ако в тази област от пространството поражението на целта се осъществява със зададена вероятност, то тя се нарича зона за поражение.

Далечната граница на зоната за поражение е 240 km, близката – 17 km. Най-малката и най- голямата височина на тази зона е 0,3 и 40,8 km. Освен това зоната за поражение на ЗРС С-200ВЭ притежава зона за обстрел и зона на гранично разстояние на стрелба, в която вероятността за поражение е по-ниска, отколкото в зоната за поражение. Граничното разстояние за стрелба е 255 km. Системата осигурява унищожение на маневриращи цели, летящи със скорост до 1200 m/s (4320 km/h). Освен това, осигурява се поражение на цели, прилагащи маньовър по курс с преминаване през курсовия параметър, а също и на баражиращи цели (цели с много малка радиална скорост). Към последния клас цели се причисляват самолетите за ДРЛО “AWACS”, Е-2С и др. По цели с отрицателна радиална скорост до 300 m/s се прилага стрелба “в догон”.

Срокът за привеждането на ЗРС С-200ВЭ в готовност № 1 от готовност № 2 е няколко минути В режим на ускорена подготовка това време е 6 min, а при хранване от дизелова електростанция (ДЕС) – 8 min. Системата е превозима. Но на практика е стационарна. Нейното развързване за бойни действия е 24 h. Времето за непрекъсната работа е 12h с последваща почивка от 1 h. Експлоатацията може да се осъществява в диапазон от температури -40^0 до $+50^0$ С, при скорост на вятъра до 25 m/s и на височина до 1000 m над височината на морето.

ЗРС С-200ВЭ е с полуактивно самонасочване. В такива системи източника за подсветяване на целта с електромагнитна с.в.ч. енергия е разположен на земната повърхност. Приемника на отразената от целта енергия е разположен на борда на ракетата. Там се намират и координаторите за целта и ракетата, устройството за изработване на командите на ракетата и други устройства, необходими за осигуряване на полета на ракетата към целта и нейното унищожаване.

Особеност на ЗРС като система за далечно действие и следователно притежаваща много висок енергетически потенциал (последният в определена степен е постигнат чрез използването на много тесни диаграми на предавателните и приемните антени), е че източника за подсвет на целта и главата за самонасочване (ГСН) на ракетата до въвеждането на режим автоматическо съпровождане, изискват предварително насочване към целта от външни източници за радиолокационна информация (Автоматизирани системи за управление от типа “Сенеж” и “Байкал”).

По такъв начин, принципа на работа на системата се свежда към следното. Чрез средствата за външно целеуказване радиолокаторът за подсвет на целта се насочва към целта. Включва се предавателя и целта се открива. При неточно целеуказване радиолокаторът за подсвет на целта има възможност да осъществи търсене на целта в неголям обем от пространството около координатите на целеуказването. След като се открие целта радиолокаторът за подсвет на целта (РПЦ) се насочва към нея, а следящите системи осъществяват захват и автосъпровождане на целта. Съпровождането на целта изисква непрекъснато подсветяване с електромагнитна енергия. Зенитната управляема ракета (ЗУР) преди старта се насочва към целта чрез целеуказване, постъпващо от РПЦ. Особеност на работата на системата е, че в координатите на целта, измервани от РПЦ, се въвеждат поправки, отчитащи паралакса в координатите на точката на старт на ракетата. Това е предизвикано от голямото отдалечаване на ЗУР от РПЦ. Последното се използва като способ за отслабване влиянието на мощния сигнал на РПЦ върху приемното устройство на ЗУР.

След насочването на ЗУР към целта, тя (ракетата) се привежда в режим на автоматическо съпровождане и се осъществява нейното изстрелване. След долитането на ракетата до целта радиовзривателят осъществява взривяване на бойната част.

Освен разгледаният способ на използване на ЗУР съществуват и други способности. Например, ЗУР се насочва към целта по обикновения способ, но захващането на целта от ракетата на автосъпровождане се осъществява след старта (6s след стартирането на ракетата). Разнообразните способности при използването ЗУР повишават ефективността на стрелбата по различните видове цели. За осигуряването на последното РПЦ има възможност да излъчва различни по структура сондиращи сигнали.

Тактическите характеристики на ЗРС С-200ВЭ са дадени в таблица 1.

Таблица 1

| Характеристики | ЗРС С-200ВЭ “Вера” |
|--|--------------------|
| Максимална скорост на целта | 1200 m/s |
| Далечна граница на зоната за поражение | 240 km |
| Близка граница на зоната за поражение | 17 km |
| Горна граница на зоната за поражение | 40 km |
| Долна граница на зоната за поражение | 0,3 km |
| Вероятност за поражение на цел с 1бр. ракети | 0,72 - 0,99 |
| Брой канали за цел | 1 |
| Брой канали за ракетата | 2 |
| Дължина на ракетата (mm) | 10800 |
| Калибър на ракетата(маршева степен)mm | 860 |
| Стартова маса на ракетата, kg | 7100 |
| маса на бойната част на ракетата, kg | 217 |

1.2 Състав на ЗРС С-200ВЭ

В състава на ЗРС влизат 3-5бр. ЗРК , обединени в стрелбови канали и Технически дивизион.

ЗРК С-200 – е едноканален превозим (полустационарен) комплекс поместен на прицепи и полуприцепи.

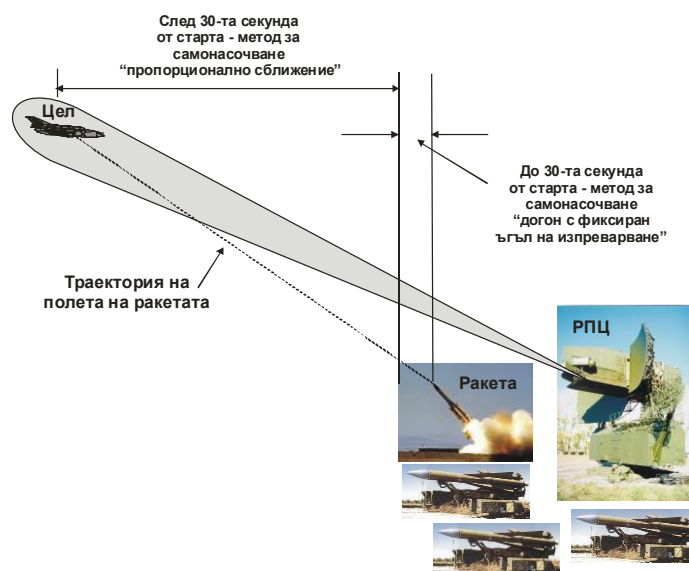
- I. Общо системни средства:
 - пункт за управление и целеуказване К-9М;
 - дизелова електростанция 5Е97;
 - подвижна трансформаторна подстанция ПТП-560;
 - разпределителна кабина К21М;
 - контролна вишка К7
- II. Зенитен ракетен дивизион:
 - антенен пост К-1В с радиолокатор за подсвет на целта;
 - апаратна кабина К-2В;
 - кабина за подготовка на старта К-3В;
 - разпределителна кабина за електрозахранване К21М;
 - Цифрова електронноизчислителна машина „Пламя“;
 - подвижна трансформаторна подстанция ПТП-320;
 - дизелова електростанция 5Е97(ДЕС-200).
- III. Стартова позиция 5Ж51В в състав:
 - 6 бр. пускови установки 5П72В с ракети 5В28(5В21);
 - 12 бр. зареждащи машини 5Ю24;
 - транспортно-зареждащи машини 5Т82;
 - автоvlak 5Т23.
- IV. Автономни средства за целеуказване в състав:
 - Радиолокационна станция за разузнаване и целеуказване П-14Ф;
 - Радиовисотомер П-13М (17).

Бойната работа на ЗРС С-200 се управлява от Автоматизирани системи за управление от типа “Сенеж” и “Байкал”.

Радиолокаторът за подсвет на целта 5Н62В е високопотенциална радиолокационна станция с непрекъснато излъчване и мощност 3,2 kW . Тя осъществява търсене, съпровождане и изработва информация за момента за старт на ракетите. Освен това РПЦ подсветява целта в процеса на самонасочване на ракетата, т.е. приложен е полуактивен метод на радиолокация (фиг.1)

Както беше казано РПЦ използва сондиране на пространството с монохроматичен сигнал и чрез доплеровска филтрация на отразените сигнали осъществява селекция откриване, (разрешение) и съпровождане на целта по скорост. Въвеждането на фазокодово манипулирани сигнали (ФКМС) позволява съпровождането (определянето) на координатата разстояние до целта. По такъв начин в РПЦ са осигурени два основни режима на работа:

- МХИ (монохроматическо излъчване), режим „Гладкий”;
- ФКМ (фазокодова манипулация), режим „ФКМ”.



Фиг. 1 Полуактивен метод на радиолокация при самонасочване на ЗУР

При използване на режим МХИ въздушният обект се съпровожда по 3 координати (азимут, ъгъл на място и скорост), а при използване на режим ФКМ – по 4 координати (азимут, ъгъл на място, скорост и разстояние). В режим МХИ на екраните на индикаторите в кабината за управление отметката от целта се наблюдава като светеща лента от долния до горния край на екрана. При преминаване в режим ФКМ оператора извършва т.н. отстраняване на нееднозначността по разстояние (тази операция изисква време - до 30s) и сигналът от целта придобива нормален вид (отметка). При стрелба на не големи разстояния режим ФКМ не се използва тъй като времето за отстраняването на нееднозначността по разстояние и времето за пребиваване на целта в зоната за стрелба са почти еднакви и вероятността за пропуск на целта е много голяма.

Стартовата позиция е предназначена за предстартова подготовка и изстрелване на ракетите и се състои от стартови площадки за пусковите установки (ПУ) и зареждащите машини (ЗМ) с централна площадка за кабината за подготовка на старта, електростанция и система от пътища, осигуряващи автоматическо зареждане на ПУ на безопасно разстояние.

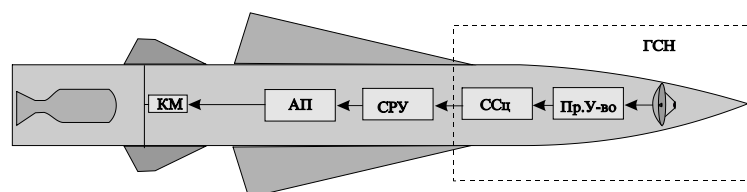
Отделната ПУ 5П72 представлява много сложна автоматизирана машина и осигурява предстартова подготовка, насочване и пуск на ракетата. Електрическата система на ПУ позволява за 35 s да се осъществи завъртане на направляващата с ракетата на 179^0 по азимут и за същото време на 48^0 по ъгъл на място. Управлението на работата на механизмите на ПУ се осъществява от кабината за подготовка на старта. След старта на ракетата ПУ автоматически се стикова с една от двете ЗМ 5Ю24 на която има ракета и в автоматичен режим се осъществява зареждане.

Зареждащата машина 5Ю24 двусосна машина, движеща се по релсов път с опори за ракетата и различни механизми и агрегати, осъществяващи придвижване, зареждане, връщане в изходно състояние и др. ЗМ се укрива в арочно укритие (укритие подобно на това за съхранение на самолетите, осигуряващо защита от авиационни бомби).

Техническата позиция (ТП) 5Ж61Д е предназначена за съхранение, подготовка за бойно използване и попълване на СП с ракети 5В28М. ТП представлява технологически поток, осигуряващ сглобяване на ракетите, тяхното снаряждане, контрол, зареждане с гориво и окислител и транспортировка на окончателно готовите ракети на СП.

1.3 Зенитна управляема ракета 5В28

Зенитната управляема ракета 5В28 е двустепенна, изпълнена по нормална аеродинамична схема, с 4 бр. триъгълни крила. Първата степен се състои от 4 бр. барутни ракетни двигатели (стартови ускорители), монтирани между крилата и отделящи се след завършване на работата си (3-5 s след старта). Маршевата степен представлява двукомпонентен течно-ракетен двигател (ТРД) с турбопомпена система за подаване на горивото и окислителя в горивната камера на двигателя. Конструктивно маршевата степен (фиг.2) се състои от редица отсеци, в които са разположени ГСН, блоковете на бордовата апаратура, осколочно-фугасната бойна част с предпазително-изпълнителен механизъм, резервоари с гориво и окислител, ТРД, кормилни машини и др. Стартът на ракетата е наклонен с постоянен ъгъл на място (48^0). Бойната част е осколочно-фугасна с готови поразяващи елементи – 37000 бр. всеки с тегло 3-5 g.



Фиг. 2 Структурна схема на самонасочваща се ракета

При взривяване на бойната част ъгъл на разлитане на осколките е 120^0 , което почти винаги довежда до гарантирано унищожаване на целта.

Управлението на полета на ракетата е по метода на “ Догонване с постоянен ъгъл на изпреварване” – на началния участък от полета и по метода “Пропорционално сближение”- в крайния участък на полета. За осъществяване на теснолентова филтрация на отразените сигнали от целта на борда на ЗУР е монтиран в.ч. хетеродин.

След предстартовата подготовка (време за готовност за стрелба 1.5 min), ракетата стартира вече при автоматическо съпровождане на целта от ГСН. При липса в течение на 5 s на сигнал от целта, който се осигурява чрез подсветяването от РПЦ, главата за самонасочване на ракетата самостоятелно започва търсене по скорост. От начало тя търси целта в тесен диапазон. След като направи 5 сканирания в тесен диапазон преминава на 30 kHz- широк диапазон на търсене. Ако подсвета на целта се възобнови, ГСН намира целта, осъществява презахват и продължава по нататъшното си самонасочване. Ако след извършване на всички операции ЗУР не “намери” целта, то на кормилата се подават команди ”максимално вверх”. Ракетата отива в горните слоеве на атмосферата и се самоликвидира.

1.4 Разположение на ЗРК на позицията. Изисквания към позицията

За изпълнение на бойната задача групата дивизиони ЗРК С-200ВЭ се развърща на предварително подготвена топопривързана позиция. В зависимост от степента на инженерното оборудване позициите могат да са стационарни и полеви вариант.

ЗРК се разполагат на позицията в определен ред. Надлъжната ос на позицията се ориентира на местността под ъгъл $65^{\circ} \pm 20^{\circ}$ (срещу часовниковата стрелка) по отношение на основното направление за стрелба. Това се обуславя от необходимостта да се отслаби нивото на сигнала от предавателя на РПЦ в приемните устройства на ГСН на ЗУР. За да се намали това ниво до нивото на собствените шумове на приемника на ГСН центъра на стартовата позиция се отдалечава от РПЦ на 810 m. Тези мерки способстват и за намаляване на нивото на облъчване на личния състав от състава на стартовата батарея при бойна работа.

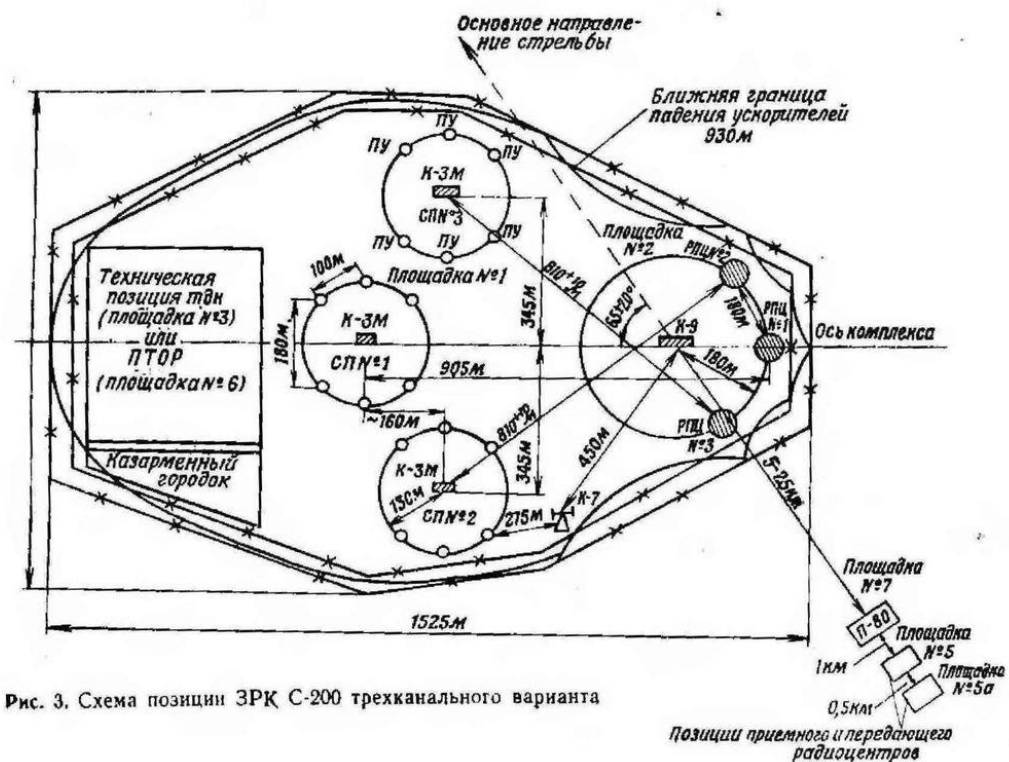


Рис. 3. Схема позиции ЗРК С-200 трехканального варианта

Фиг. 3 Позиция на група дивизиони (оригинал)

Позицията на групата дивизиони включва радиотехническа, стартова и техническа позиции.

На радиотехническата позиция се разполагат К9М, 4 бр. ДЕС-200, ПТП-560, К21(в центъра на позицията) и отдалечени от центъра на 180m и разположени на равни разстояния една от друга РПЦ. Вишката К7 се изгражда извън основното направление за стрелба, между радиотехническата и стартовата позиция, на разстояние не по-малко от 450 m от РПЦ и не по-малко от 375 m от най-близката ПУ. РЛС П-14Ф (Станция за разузнаване и целеуказване) се разполага на не по-малко от 1000 m от центъра на радиотехническата позиция, а ПРВ-13М на не по-малко от 500 m.

В центъра на стартовата позиция на стрелбовия канал се разполагат К3В, ПТП-320 и ДЕС, на разстояние 130 m – пусковите установки. Зареждащите машини се разполагат на 30 m от ПУ .

Позицията на ЗРК С-200ВЭ трябва да удовлетворява следните основни изисквания:

- ъглите на закритие, измерени на 6,5 m от основата на ПУ и на антенния пост К1В не трябва да превишават 20° ;
- между РПЦ, ГСН и К7 трябва да има пряка видимост. Това осигурява разпространение на електромагнитната енергия между тях по време на контрол на функционирането и по време на регламентни работи;
- Радиолокационните средства трябва да се разполагат на не по-малко от 2 km от токозахранващата промишлена мрежа и електрифицирани ж.п. магистрали и на 1 km от шосейни магистрали. Позицията на ЗРК трябва да е отдалечена на 20 km от пресичащи авиокоридори;

- В района на разположение на ЗРК (на разстояние 10 km) не трябва да има железобетонни съоръжения с височина до 10 m ;
- Населените пунктове трябва да отстоят от позицията на не по-малко от 5 km;
- Разнасянето по честота на РПЦ, влизащи в състава на ЗРС трябва да бъде не по-малко от 100 MHz, а работещите на една и съща честота РПЦ трябва да се разполагат на не по-малко от 160km. ЗРС, състояща се от 3 бр. канали заема позиция с площ 1100 dka.

2. Принципи на построение

2.1 Реализация на тактическите изисквания към радиотехническите средства на ЗРК

Радиотехнически средства на ЗРК, осигуряващи изпълнение на тактическите изисквания по унищожаването на СВН са предавателното и приемното устройство на РПЦ и приемното устройство на ГСН на ЗУР. Основно тактическо изискване е разстоянието на унищожаването на целта, което се определя от далечната граница на зоната на поражение. За комплекса за далечно действие тя трябва да бъде от порядъка на 240 km.

Поражението на целта се предшества от нейното откриване от РПЦ, насочване и захват на автосъпровождане от РПЦ, подаване на целеуказване на борда на ЗУР, насочване и захват на автосъпровождане (АС) от ГСН, изстрелване и полет на ракетата. Очевидно е, че за унищожаване на целта е необходимо известно време. Следователно, необходимото разстояние за откриване на целта от РПЦ ще е по-голямо от разстоянието до далечната граница на зоната за поражение. Нека определим исканото разстояние за откриване, считайки че срещата на ракетата с целта ще се осъществи на разстояние 240 km, а целта лети с максимална скорост $V_{цmax} = 1200 \text{ m/s}$. Да предположим, че РПЦ получава грубо целеуказване. Тя осъществява развъртане на антените си системи по посока на целта и включва секторно търсене. За поставяне на изходните данни за търсене се изисква време

$t_{уст. изх. данни} < 20 \text{ s}$. След включването на секторното търсене се осъществява нейното откриване и захват на АС. Тази операция отнема не повече от 80 s. И така

$$t_{откр_{и}} AC_{РПЦ} \leq 80s \quad (1)$$

Насочването и включването на ГСН на АС изисква 8-10 s, т.е.

$$t_{НАС_{и}} AC_{ГСН} \leq (8 - 10)s \quad (2)$$

Изстрелването на ракетата се осъществява приблизително за $t_{п} = 3s$. След задръжка на старта ($t_{зс} = 2 \text{ s}$) ракетата осъществява полет към целта, който протича за време $t_{пол} = 215 \text{ s}$. По такъв начин, пълното време за обстрел на целта е не по-голямо от 330 s. Исканото разстояние за устойчиво съпровождане от ГСН определяме от следния израз:

$$d_{АСГСН_{искано}} = d_{д} + V_{цmax}(t_{пол} + t_{зс} + t_{п}), \quad (3)$$

където: $d_{д}$ - далечна граница на зоната за поражение.

Исканото разстояние за устойчиво съпровождане от РПЦ определяме от следния израз:

$$d_{АСРПЦ_{искано}} = d_{АСГСН} + V_{цmax}t_{НАС_{АСГСН}}. \quad (4)$$

Исканото разстояние на откриване от РПЦ определяме от следния израз:

$$d_{откр_{РПЦ}_{искано}} = d_{АСРПЦ} + V_{цmax}(t_{откр_{и} АСРПЦ} + t_{уст. изх. данни}), \quad (5)$$

След поставяне на известните данни в дадените изрази получаваме исканото разстояние на откриване от РПЦ:

$$d_{\text{ОТКРРПЦискано}} \approx 630 \text{ km}.$$

Ако поставим във израз (6) малко по-малки стойности на времената, то получаваме:

$$d_{\text{ОТКРРПЦискано}} \approx 450 - 500 \text{ km}.$$

Какви трябва да бъдат техническите характеристики на РПЦ и ГСН, за да изпълнят тактическите изисквания от гледна точка на разстояние на откриване и автоматическо съпровождане на целта?

Разстоянието на откриване на РЛС в свободното пространство се определя чрез класическото уравнение:

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_{\Pi} G_{\Pi} G_{\text{ПР}} \lambda^2 \sigma_{\text{Ц}}}{(4\pi)^3 P_{\text{ПР ПРАГ}}}}, \quad (6)$$

където: P_{Π} - средна мощност на предавателя;

G_{Π} , $G_{\text{ПР}}$ – коефициент на усилване на предавателната и приемната антени;

$P_{\text{ПР ПРАГ}}$ – прагова чувствителност на приемника;

$\sigma_{\text{Ц}}$ – ефективна отразяваща повърхност на целта;

λ - дължина на вълната.

Праговата чувствителност на приемника се определя от изказа:

$$P_{\text{ПР ПРАГ}} = P_{\text{Прmin}} \cdot q,$$

където: $P_{\text{Прmin}}$ – гранична чувствителност на приемника;

q – искано отношение $P_{\text{сигнал}}/P_{\text{шум}}$ на изхода на приемника.

Очевидно е, че за да се увеличи разстоянието на откриване на РЛС е необходимо да се увеличи потенциалът на станцията, т.е.

$$P_{\Pi} = \frac{P_{\Pi} G_{\Pi} G_{\text{ПР}}}{P_{\text{ПРmin}}}.$$

Увеличаването на последния се постига чрез увеличаване мощността на предавателя, коефициента на усилване на антените и намаляване на $P_{\text{Прmin}}$.

Нека разгледаме пътищата за повишаване на потенциала на РЛС и преди всичко възможността за увеличаване на P_{Π} .

Стойността на средната мощност на импулсния предавател се определя от изказа:

$$P_{\Pi} = \frac{P_u \tau_u}{T_0},$$

където: - P_u – импулсна мощност на предавателя;

τ_u – продължителност на сондиращия импулс;

T_0 - период на повторение на сондиращия импулс.

За импулсните Станции за насочване на ракети (Например СНР на ЗРК С-75М) от ЗРВ, стойността на тези параметри се намират в границите: $P_u \approx 1 \text{ MW}$, $\tau_u \approx 0,4 \mu \text{ S}$, $T_0 \approx 500 \mu \text{ S}$.

Средната мощност за такава СНР е $P_{\Pi} = 0,8 \text{ kW}$. При такава мощност на сондиращия сигнал СНР на ЗРК С-75М притежава разстояние за откриване $d_{\text{ОТКР}} = 150 \text{ km}$.

За да увеличим разстоянието на откриване 4 пъти, т.е. то да стане 600 km е необходимо да увеличим мощността на предавателя 256 пъти. В мобилните СНР това е невъзможно да бъде постигнато при съвременното състояние на СВЧ технологии.

Увеличаването на потенциала на радиолокатора може да бъде постигнато чрез увеличаване на чувствителността на приемника, т.е. чрез намаляването на

$$P_{\text{Prmin}} = k \cdot T \cdot \text{Ш} \cdot \Delta F,$$

където: - k – константа на Стефан – Болцман;

- T – абсолютна температура;

- Ш – коефициент на шум;

- ΔF – лента на пропускане на приемното устройство.

Коефициентът на шума на суперхетеродинните радиоприемници с УВЧ на лампа с бягаща вълна (ЛБВ) е в границите на 8-12. Да се понижи стойността на този коефициент е възможно чрез използването на параметрически УВЧ. Обаче използването на последните при много големи мощности за сондиране е ограничено, поради тяхната неспособност да осигуряват надеждна защита на приемника от просмукващата се мощност на предавателя (за разлика от ЛБВ).

По такъв начин остава единствената възможност да се повиши чувствителността на приемника чрез намаляване на лентата на пропускане на приемника ΔF .

В импулсните РЛС без кохерентно натрупване на сигналите, лентата на пропускане на приемното устройство трябва да бъде съгласувана с широчината на спектъра на приемания сигнал. При $\tau_u = 0,4 \mu\text{s}$ и при квазиоптимална обработка е необходима лента на пропускане (формула на Сифоров) не по-малка от:

$$\Delta F = \frac{1,37}{\tau_u} \approx 3,5 \text{ MHz}.$$

Следователно, получаването на исканото разстояние за откриване е невъзможно да стане чрез прости импулсни сигнали като при това се осигури висока разрешаваща способност по разстояние. Освен това, такива сигнали не позволяват осигуряването на висока степен на защита на РПЦ и ГСН срещу неорганизираните смущения (пасивни смущения). Това се обяснява с факта, че при големи разстояния на откриване периода на повторение на сондиращите импулси T_0 е много голям (за да се осигури еднозначност при определянето

на разстоянието до целта), честотата $F = \frac{1}{T_0}$ е стотици Hz. На честоти, кратни на F се

появяват “слепи скорости”, при които се осъществява режекция на полезния сигнал на изхода на СДЦ.

Направеният анализ показва, че за съществено повишаване на потенциала на РПЦ е необходимо да се приложи друг тип радиолокация, а именно радиолокация с непрекъснато излъчване на монохроматичен или фазокодоманипулиран сигнал.

В РПЦ се използва предавателно устройство с мощност на непрекъснато излъчване на сондиращ сигнал 3kW. За сметка на свиване на лентата на пропускане на приемното устройство ($\Delta F_{\text{РПЦ}} = 200 \text{ Hz}$) е постигната чувствителност $P_{\text{Prmin}} = 10^{-17} \text{ W}$,

а в ГСН при $\Delta F_{\text{РПУ ГСН}} = 400 \text{ Hz}$, $P_{\text{Прmin}} = 0,410^{-16} \text{ W}$.

При анализа възможностите за повишаване на потенциала на РПЦ чрез увеличаване на коефициента на усилване на антените не се разглеждат. И все пак, коефициента на усилване на антената получаваме от известния от теорията на антените израз:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{\text{эф}},$$

където: $A_{\text{эф}}$ - ефективна площ на разкрива на антената.

Чрез увеличаване на площта на антената и чрез намаляване на дължината на вълната на сондиращия сигнал λ , диаграмата на насочено действие на антената (ДНД) може да се получи достатъчно тясна, но в допустими граници. Изследванията показват, че минималната широчина на ДНД, осигуряваща съпровождането по ъглови координати без опасност от срив на АС и при осигуряване на целеуказване с допустима точност е части от градуса.

В РПЦ е приета широчина на ДНД на предавателната антена $0,7^0$ в режим “Тесен лъч” и $1,4^0$ в режим “Широк лъч”. Коефициентът на усилване на $G_{\text{П}} = 50000$, а на $G_{\text{ПР}} = 25000$. Благодарение на това е постигнат необходимия енергетически потенциал на РПЦ и на линията РПЦ – цел – ГСН.

Освен разстоянието на откриване към РПЦ и ГСН се налагат и други тактически изисквания, като например: разрешаваща способност, защита срещу смущения и т.н.

Да разгледаме принципите за реализация на необходимата разрешаваща способност. Защита срещу смущения на ЗРК ще бъде разгледана отделно.

Известно е, че разрешението на целите е осъществено ако е извършено поне по една координата. РПЦ осъществява съпровождане по 4 координати: азимут, ъгъл на място разстояние и скорост. Очевидно е че, за осъществяване разрешение на целите е необходимо да се вземат мерки за осигуряване на висока разрешаваща способност поне по една от измерваните координати. За осигуряване на висока разрешаваща способност по ъглови координати е необходимо да се конструират антени с много тесни ДНД. Така за разрешение на две цели, намиращи се по фронта на 70-80 m на разстояние 400km е необходима антена с широчина на ДНД, равна на $1'$. Реализирането на работоспособна антена с такава малка широчина на ДНД в ЗРК е нецелесъобразно.

Високата разрешаваща способност на РПЦ е постигната по скорост, т.е.

$$\Delta V = \frac{\lambda \Delta F_{\text{РПУ}}}{2}.$$

Тъй като в РПЦ е реализирана $\Delta F_{\text{РПУ}} = 200 \text{ Hz}$, то

$$\Delta V = \frac{\lambda \Delta F_{\text{РПУ}}}{2} = \frac{0,03 \cdot 200}{2} \approx 3 - 4 \text{ m / S}.$$

Разрешаващата способност по разстояние се определя от радиуса на поражение на бойната част. Нецелесъобразно е да се осъществява разрешение на две цели ако те се поразяват с една бойна част. В ЗУР на ЗРК С-200ВЭ се използва осколочно-фугасна

бойна част с тегло 217kg и радиус на поражение 40-60 m. По такъв начин, необходимата разрешаваща способност по разстояние трябва да е не по-лоша от 60 m. Реализирането на такава разрешаваща способност по разстояние не предизвиква технически трудности.

2.2 Принципи за оптимална обработка на приеманите сигнали

В режим МХИ най-проста и целесъобразна обработка е оптималната филтрация на приетите сигнали. При оптималната филтрация лентата на пропускане на филтъра на приемното устройство се съгласува със спектъра на приемания сигнал (по-точно амплитудно-честотната характеристика (АЧХ) на филтъра е комплексно-спрегната със спектъра на полезния сигнал). Спектърът на идеалния МХ-сигнал има една хармоническа съставна. Реалният приет сигнал има спектър с определена ширина.

Ширината на този спектър се обуславя от следните фактори (фиг.1):

- разширяване на спектъра на излъчвания сигнал поради флукуация на амплитудата и фазата му;
- флукуация на ефективната отразяваща повърхност (ЕОП) на целта от условията на разпространение на електромагнитните вълни в пространството;
- от маньовъра на целта, при когото различните “блестящи точки”(хипотеза за представяне на целта чрез т.н. фацетен модел), имат различни радиални скорости и т.н.

На базата на анализа на тези фактори конструкторите на РПЦ са избрали лента на пропускане на приемното устройство на РПЦ, равна на 200Hz (измервана на нулево ниво).

Приеманите от РПЦ сигнали могат да се намират в лента от честоти на Доплер, определяна от възможните скорости на движение на целта. Тъй като

$$f_{DЦ\max} = \frac{2V_{rЦ\max}}{\lambda},$$

където: $f_{DЦ\max}$ - гранична доплерова честота, съответстваща на граничната радиална скорост $V_{rЦ\max}$.

ЗРК е предвиден за унищожаване както на приближаващи се (до 1200 m/s), така и на отдалечаващи се цели (до 300 m/s). Конструкторите са отчетли скоростите на СВН и перспективите за тяхното развитие и са определили областта от честоти в границите на които целите могат да се съпровождат от РПЦ . И действително при максимална скорост на приближаваща се цел

$$1200\text{ m/s и } \lambda = 0,03\text{ m (} f_0 = 10\text{GHz)} \text{ за } f_{DЦ\max} = \frac{2V_{rЦ\max}}{\lambda} = \frac{2 \cdot 1200}{0,03} = 80\text{ kHz}.$$

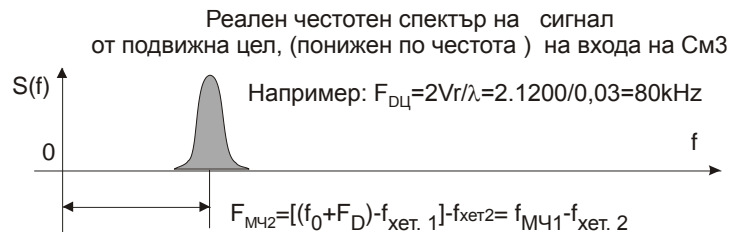
Тук дължината на вълната на носещото колебание е приета, равна на 0,03 m, т.е. $f_0 = 10\text{ GHz}$ (РПЦ излъчва непрекъснати колебания с носеща честота в диапазона 8-12 GHz).

По аналогичен начин получаваме и “долната граница” на възможни доплерови честоти, т.е. $f_{DЦ\min} = \frac{2V_{rЦ\min}}{\lambda} = \frac{2 \cdot 300}{0,03} = 20\text{ kHz}.$

Конструкторите са се подсигурили (заради възможна пренастройка на f_0) и са заложили границите на

$$-35 \text{ kHz} < f_{\text{ДЦ}} < +90 \text{ kHz}.$$

По такъв начин, оптималната обработка на МХ-сигнал се заключава в оптимална филтрация на сигнала чрез теснолентов филтър в диапазона



Фиг. 1. Реален спектър на отразен сигнал от подвижна цел

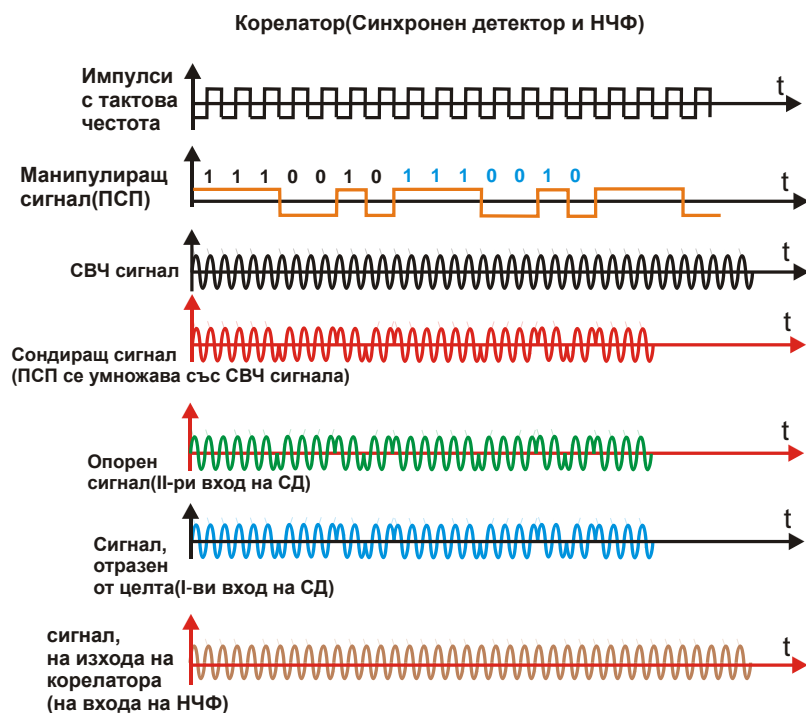
$f_{\text{ДЦ}} = (-35 \text{ kHz} \dots +90 \text{ kHz})$. Съпровождането на сигнала се осъществява чрез пренастройка по честота на приемното устройство.

Приемането на отразените сигнали от целта в режим МХИ се осъществява на фона на организирани от противника пасивни смущения (отражение от облаци диполни отражатели), на фона на пасивните смущения от земната (морската) повърхност, на фона на преотраженията от хидрометеорите и на фона на проникващия мощен сигнал на радиопредавателя. Последният се преобразува по спектър (в първия смесител на приемното устройство на РПЦ) и след това се подлага на режекия чрез филтър. Режектирацията филтър освен това осъществява потискане на пасивните организирани и неорганизираните смущения.

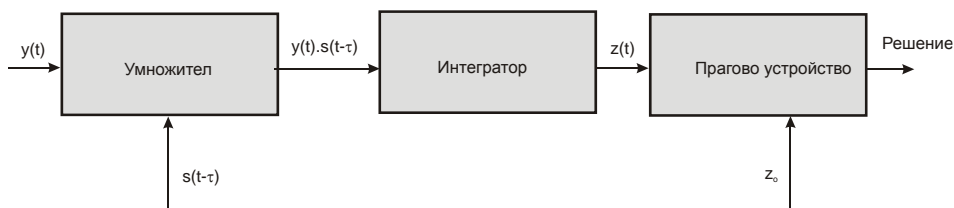
Да разгледаме обработката на ФКМ-сигнал в приемното устройство на РПЦ. В режим ФКМ се прилага корелационна обработка на сигнала от целта и след това оптимална (близка до съгласуваната) филтрова обработка на преобразувания по спектър сигнал (вече монохроматичен).

Корелационната обработка позволява да се получи голям коефициент на свиване по спектър. Класическата структурна схема на устройство, извършващо преобразуване (корелатор) е представена на фиг.2, а на фиг. 3 вариант на корелатор (реализиран в РПр.У на ЗРК С-200ВЭ). Тук ролята на умножаващо устройство изпълнява смесител, а ролята на натрупващ елемент-нискочестотен филтър. На входът на смесителя постъпват два непрекъснати ФКМ-сигнала, имащи еднаква структура. Единият от тях е на честотата на полезния сигнал (или в общ случай на междинна честота) $f_C = f_0 + f_{\text{ДЦ}}$ (или $f_{\text{МЕЖД}1} = f_{\text{МЕЖД}01} + f_{\text{ДЦ}}$, $f_{\text{МЕЖД}01}$ -номинална междинна честота след първия смесител), а другият на честотата на хетеродина $f_{\text{ХЕТ.2}}$. ФКМ-сигнал на хетеродина може да бъде задържан по отношение на сигнала от целта на време τ . Амплитудата на изходния сигнал на така организирания корелатор се определя от израза:

$$U_{\text{ИЗХ}}(\tau) = \frac{1}{\tau_{\phi}} \int_0^{\tau_{\phi}} U_C(t) U_{\text{ХЕТ}}^*(t - \tau) dt.$$



На изхода на корелатора се формира монохроматичен сигнал (при съвпадение на приетата и опорната ПСП). Пример.



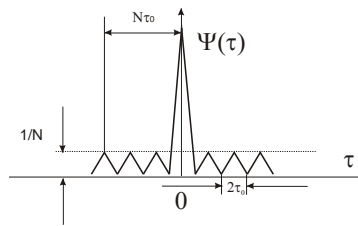
$$Z(t) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)s(t-\tau)dt \rightarrow \text{Корелационен интеграл}$$

Фиг.2. Схема на корелатор класически тип

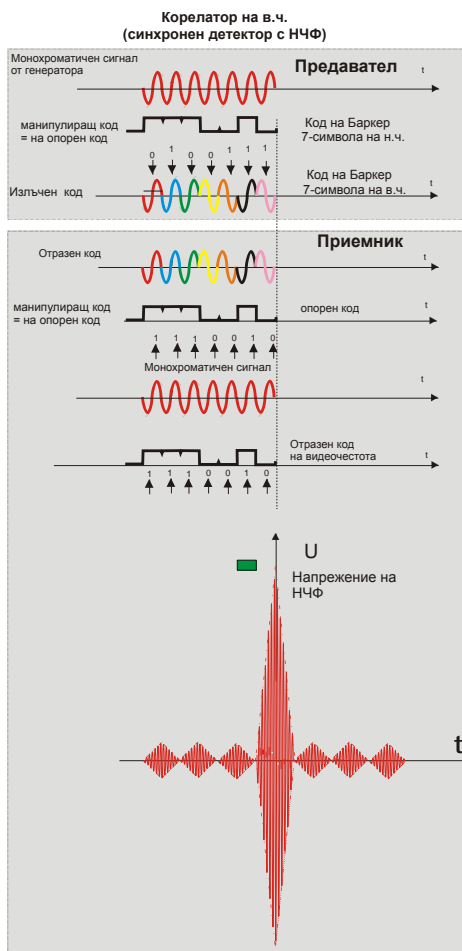


Фиг.3. Схема на корелатор (варианти на реализация)

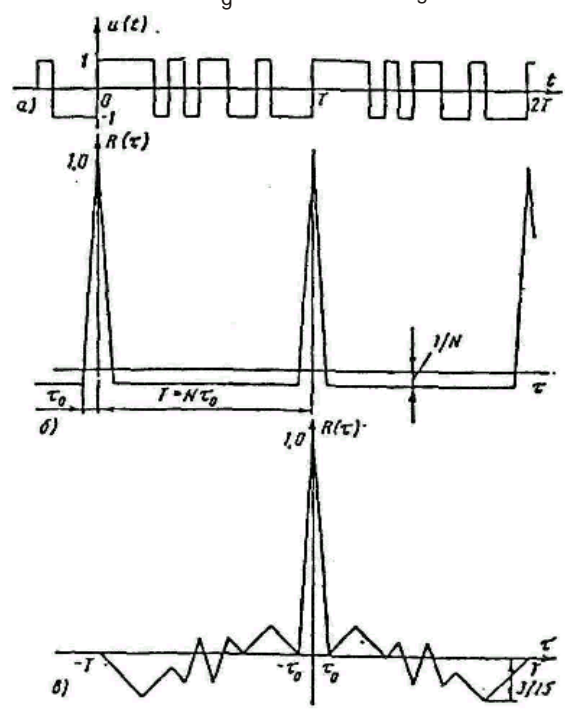
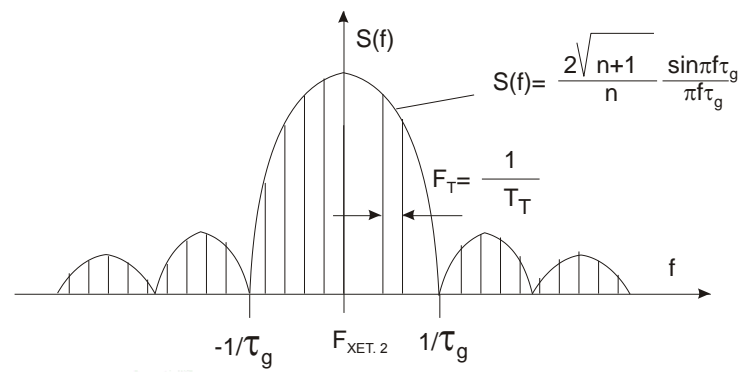
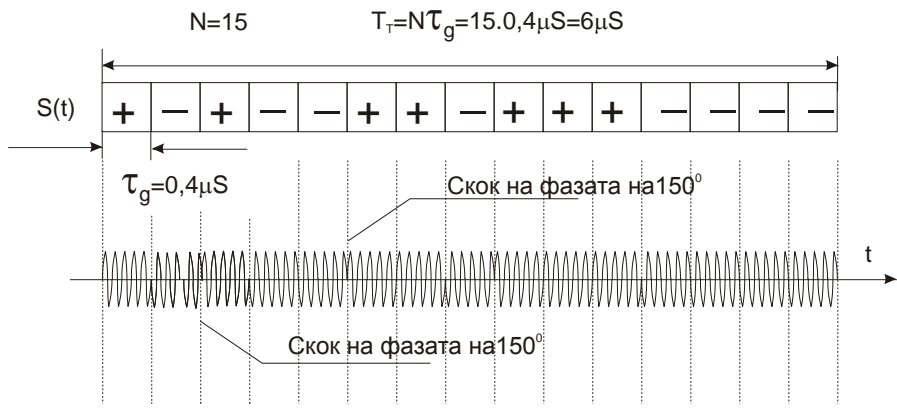
Видът на автокорелационната (за случая взаимокорелационна функция) функция, която е резултат от работата на корелатора е показана на фиг.4.



Фиг.4 Автокорелационна функция. (Примерен вид)

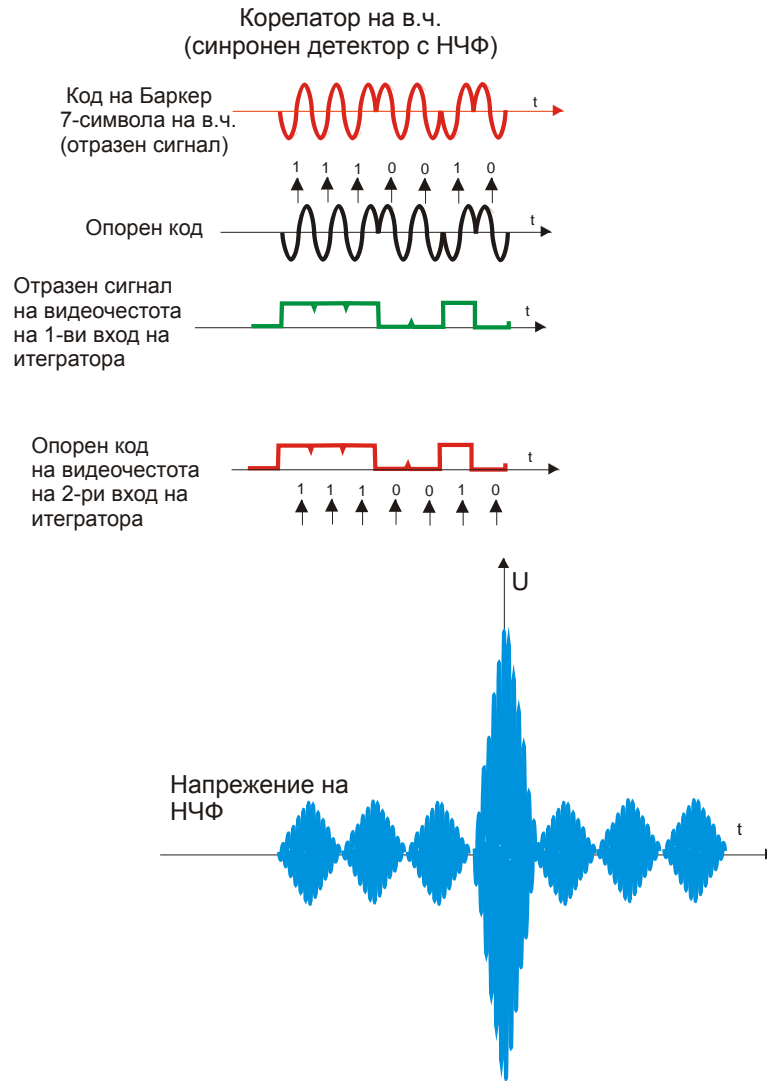


Изходен сигнал на корелатор (код на Barker)



M -последовательность с $N=15$ (а), периодическая АКФ (б), аперриодическая АКФ (в)

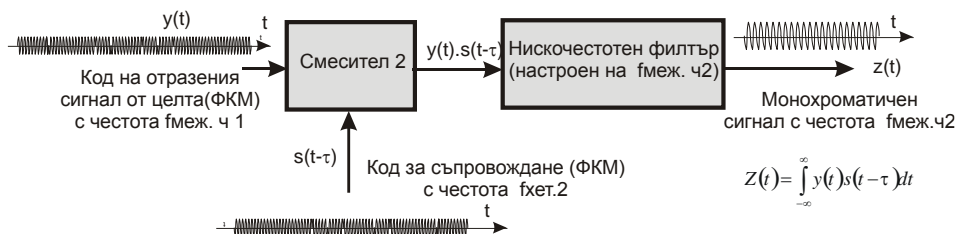
Фиг.4, б Автокорреляционна функция (вариант на реализация в ЗРК $N=15$, $\tau_g=0,4 \mu S$)



Фиг.4, в Изходен сигнал на корелатор (вариант на реализация N=7)

При $\tau=0$, $(U_{ИЗХ}(\tau) = \frac{1}{\tau_{\phi}} \int_0^{\tau_{\phi}} U_C(t) U_{ХЕТ}^*(t-\tau) dt)$ на изхода на корелатора (преобразуващото устройство) се изработва монохроматичен сигнал (колебание) с максимална амплитуда, имащ честота (в общ случай, фиг.5.)

$$f_{МЕЖД} = f_0 + f_{ДЦ} - f_{ХЕТ} = f_{МЕЖД.ч.0} + f_{ДЦ}$$



Фиг. 5. Изходен сигнал на корелатор(вариант при $\tau = 0$)

Ако $\tau \neq 0$, то на изхода на корелатора се изработва ФКМ-сигнал (с изключение на случаите, когато $\tau = n\tau_g$, където $n = \pm 1, 2, 3, \dots$ натурални числа).

Спектърът на изходния сигнал е линеен. Спектралните му съставни отстоят една от друга на честота $F_T = \frac{1}{T_T}$.

Ако тактовата честота на кода $F_T = \frac{1}{T_T}$ се избере по-малка от $f_{DC \max}$, то в диапазона от доплеровски честоти ще има няколко спектрални съставни на ФКМ-сигнал, съществуващ на изхода на преобразуващото устройство (корелатора или натовареният с НЧФ смесител).

В този случай ще се появи нееднозначност при определяне на скоростта на целта.

Централната честота на съставните на този спектър се описва от израза

$$f^0 = f_{\text{меж. ч } 0} + f_{\text{ДЦ}}.$$

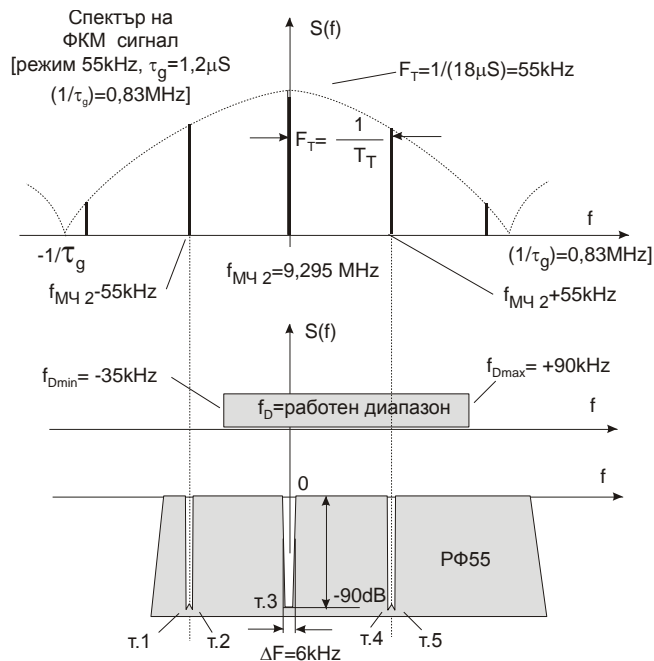
При $\tau = 0$, $\tau = n\tau_g$, където $n = 1, 2, 3, \dots$ на изхода на преобразуващото устройство се формира монохроматичен сигнал с честота $f_{\text{меж. ч } 0} + f_{\text{ДЦ}}$.

Този монохроматичен сигнал притежава амплитуда, зависеща от разликата във фазите в дискретите $\Delta\varphi$. При оптимална $\Delta\varphi$ амплитудата на изходния сигнал съответства на максималната стойност на резултата на корелационния интеграл.

След това този монохроматичен сигнал се подлага на обработка, подобна на обработката на МХ-сигнал.

За осъществяване на режекция на проникващата енергия по странични честотни съставни при работа в режим ФКМ-сигнал в РПр.У са организирани режекторни филтри.

Честотна характеристика на типов филтър е показана на фиг.6.



т.1, 5 режекция на проникващата енергия по фстр. скала Б
 т.2, 4 режекция на проникващата енергия по фстр. скала А
 т.3 режекция на проникващата енергия от предавателя и от пасивните шумения

Фиг. 6. Честотна характеристика на Режекторен филтър

За осигуряване на нормална работа на ЗРК при малки радиални скорости на целта (целта баражира) е заложена идеята за използване и обработката на ЧМ-сигнал.

Честотно-модулираният сигнал се формира от възбудителя на предавателното устройство и сигналът на възбудителя се използва като сигнал на първия хетеродин $f_{ХЕТ 1}$ на радиоприемното устройство (РПр.У). Благодарение на това при първото преобразуване на честотата в РПр.У се осъществява преобразуване на проникващия ЧМ-сигнал от предавателя. По-нататък преобразуваният сигнал се подлага на режекция чрез филтър, настроен на номиналната междинна честота .

Заедно с преобразуването на проникващият сигнал при първото преобразуване по честота на обработка се подлага и полезният сигнал от целта. Това може да се каже е принудителна обработка, съпътстваща преобразуването и на проникващите шумове. Да разгледаме резултатите от тази обработка върху полезния сигнал. Сигналът от целта е ЧМ, но по някои параметри се различава от сигнала на възбудителя ($f_{ХЕТ 1}$). Разликата е в това, че той е задържан по отношение на $f_{ХЕТ 1}$ на време $t_3 = \frac{2D_{Ц}}{c}$, където $D_{Ц}$ е разстоянието до целта, а c – скоростта на разпространение на електромагнитната енергия в приземния слой на атмосферата.

В резултат на умножението на тези сигнали и последваща честотна селекция на междинна честота изходният сигнал на преобразувателя ще бъде също ЧМ-сигнал, чиято модулираща функция си остава предишната, т.е. $F_M = 400$ Hz, но амплитудата и фазата на модулиращата функция (в отразения сигнал) съществено се изменят в сравнение с тези на възбудителя. Те стават функции на $D_{Ц}$. Централната честота на съставните на спектъра на ЧМ-сигнал се описва от израза: $f_{0ЧМ} = f_{Меж. ч 0} + f_{ДЦ}$.

По-нататъшната обработка на този сигнал е корелационна защото ширината на спектъра на сигнала от целта зависи от разстоянието до целта ($D_{Ц}$), т.е. не е възможно прилагането на оптимална филтрация. За осъществяването на корелационната обработка се изработва сигнал от хетеродина, идентичен със сигнала от целта на $f_{\text{меж. ч 1}}$, но на честотата на хетеродина.

При преобразуване на честотата се осъществява преобразуване на ЧМ-сигнал от целта. След това сигналът от целта се подлага на честотна селекция подобно на обработката на монохроматичния сигнал в режим МХИ.

При работа на РПЦ в режимите на МХИ и ФКМ-сигнали както вече беше казано възникват трудности при съпровождането на нискоскоростни, маневриращи цели и цели преминаващи през параметъра на стрелбата, т.е. цели, имащи малка F_D (малка доплеровска добавка по честота). Това се обяснява с факта, че $F_D = 2V_{Ц} \cos \alpha_{Ц} (c/f)$. Освен това сигналите с малка F_D (малка $V_{Ц}$) се режектират от филтър, организиран в РПр.У на РПЦ за осъществяване на режекция на проникващия сигнал на предавателя, който е с честота f_0 .

Лентата на режекция на режекторния филтър, съответстваща на спектъра на проникващия сигнал е сравнително широка и е размер $\Delta F_{P\phi} = \pm 2,3 kHz$ (фиг.6.). Затова ако $V_{rц} \leq |\pm 46m/S|$, то сигналът от целта не преминава през приемника на РПЦ.

Невъзможността за съпровождане на цели с малка $V_{Ц}$ (а впоследствие и унищожаването им) е сериозен тактически недостатък на ЗРК. За отстраняването на този недостатък е въведен режим на излъчване на ЧМ-непрекъснати сигнали. Принципът на работа на РПЦ по цели с малка $V_{Ц}$ сега се заключава в това, че отразеният сигнал от целта ще има по-широк спектър, част от който ще излезе извън зоната на режекция на режекторния филтър и ще бъде приета от РПр.У на РПЦ.

Анализът на работата на приемното устройство при работа на РПЦ в режим на ЧМ-излъчване е доста сложен и излиза извън рамките на разглеждания материал

При такъв сигнал (с ЧМ-излъчване) на изхода на преобразуващото устройство ще се изработи монохроматичен сигнал на честота, равна на номиналната стойност на междинната честота. За сметка на въвеждането в сигнала на хетеродина изместването по честота (допълнителна) ще се осъществи едновременно и преобразуване на сигнала по скорост. След това този сигнал може да се подложи на теснолентова честотна селекция. Реално точно така се извършва обработката на ЧМ-сигнал, отразен от целта, обаче пълно преобразуване на сигнала от целта не се извършва, тъй като сигналът след първото преобразуване по честота се подлага на режекция в честотен режекторен филтър.

2.3 Принцип на построение на приемното устройство на РПЦ

(Обща структурна схема)

Ще отбележим някои особености на РПр.У (фиг.8), произтичащи от принципите на обработка на приеманите сигнали. С тези особености са свързани и реализираните схемни решения.

Процесът на обработка на сигналите от целта и режекцията на смущенията е многоетапен процес. Всяко спектрално преобразуване е свързано с преобразуване по честота. От сега е ясно, че РПр.У е построено по принципа на приемник суперхетеродинен тип с многократно (*четирикратно*) преобразуване по честота.

От разгледаните принципи за обработка на сигналите следва, че за осъществяване на преобразуване на спектъра на ФКМ-сигнал и ЧМ сигнал или за оптимална филтрация на МХ-сигнал се изисква непрекъснато съвместяване на кодовете на ФКМ-сигнал по време τ между опорният (на хетеродина) сигнал и сигнала от целта и параметрите на модулиращата функция на опорния сигнал и сигнала от целта, а също и настройка на честота $f_{\text{меж. ч 0}} + f_{\text{ДЦ}}$. Тези функции може да се изпълняват следящи системи по разстояние и преобразуване на ЧМ-сигнал по честота (скорост). По такъв начин, приемното устройство на РПЦ трябва да бъде приемно устройство за съпровождане, чийто функционални елементи са следящи системи за съпровождане на сигнала от целта.

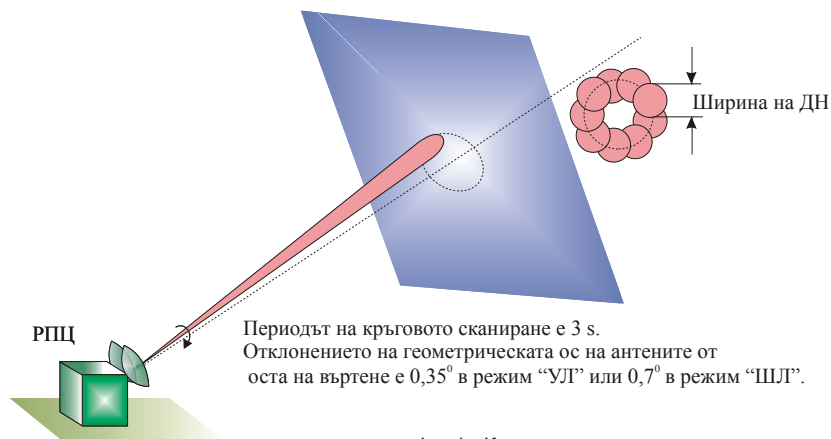
Приемното устройство и по разстояние и по скорост е теснолентово. Тъй като лентата на удържане на следящата система по разстояние се определя основно **от** ширината на корелационната функция, равна на $2\tau_g$. Лентата на пропускане на системата за съпровождане по скорост съответства на лентата на пропускане на филтъра и равна на 200 Hz. Областта (по време и честота), която заемат входните сигнали на тези системи е много по-голяма от лентите на удържане, т.е. преди следящите системи да започнат АС те трябва да бъдат “насочени”. Насочването чрез външно целеуказване не е възприето поради опасения за ниска точност. Функциите на предварително насочване изпълнява оператор, работещ по информация, получавана от индикатора на приемното устройство за обзор. Тази информация позволява да се оцени цялата област на възможни стойности по разстояние и скорост. По такъв начин, РПЦ трябва да има две приемни устройства:

- приемно устройство за съпровождане (ПУС);
- приемно устройство за обзор (ПУО).

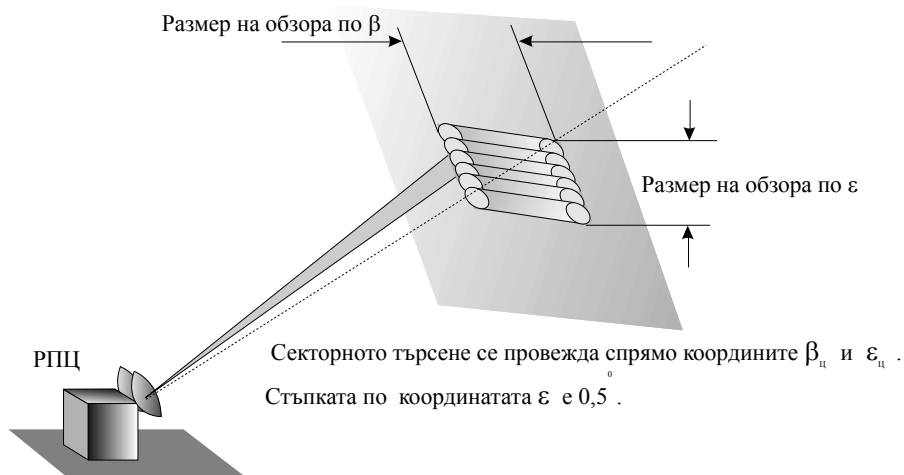
За да охарактеризираме по-пълно структурата на РПр.У ще се спрем на една особеност, която е предизвикана от приетия принцип на построение на пеленгатора по ъгъл. В РПЦ е реализиран двуканален (по всяка ъглова координата) пеленгатор, осъществяващ мигновено амплитудно сравнение на сигналите в каналите. Във връзка с това приемното устройство за съпровождане трябва да е триканално.

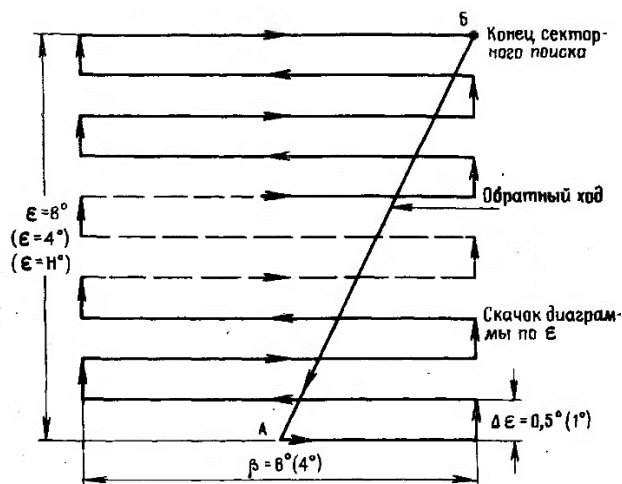
Кръговото сканиране се прилага след като не се открие целта на индикаторите за обзор по скорост. Ако в течение на 10 s чрез кръгово сканиране целта не се открие се прилага секторно търсене.

Кръгово сканиране се нарича такова пространствено преместване на ДН на антените, когато геометрическата ос на антените чертае линия върху плоскост, перпендикулярна на посоката $\beta_{ц}$, $\epsilon_{ц}$ от РПЦ (перпендикулярна на оста на въртене), във вид на окръжност. Периодът на кръгово сканиране на РПЦ е 3 s. Отклонението на геометричната ос на антените от оста на въртене е $0,35^{\circ}$ в режим “Тесен лъч” или $0,7^{\circ}$ в режим “Широк лъч”.



Фиг.1а Кръгово сканиране





Фиг. 3.1, б Секторно сканиране

Секторното търсене се осъществява по отношение на координатите $\beta_{Ц}$, $\epsilon_{Ц}$ по схемата, показана на фиг. 3. 1, б. Използват се 4 бр. сектора за търсене с ъгли размери $8^{\circ} \times 8^{\circ}$, $8^{\circ} \times 4^{\circ}$, $4^{\circ} \times 8^{\circ}$ и $4^{\circ} \times 4^{\circ}$. Отместването по координатата $\epsilon_{Ц}$ е равно на $0,5^{\circ}$.

Секторното търсене също се прилага в режимите “Тесен лъч” или в “Широк лъч”. При това ширината на ДН на предавателната антена е съответно равна на $0,7^{\circ}$ и $1,4^{\circ}$. Ширината на ДН на приемната антена е съответно равна на $1,4^{\circ}$ и не се променя.

Резултатите от кръговото и секторното търсене се изобразяват на индикатора за кръгово сканиране и на индикатора за секторно сканиране. След като открие отметката от целта, чрез шурвалите операторът изменя положението на антените по координатите β , ϵ така, че оста на кръговото сканиране да съвпадне с целта, а секторното търсене се изключва когато целта се намира в диаграмата на насочено действие на антената.

2.5 Измерване на ъгловите координати на целта;

В РЛС се използват две групи методи за измерване на ъгловите координати на целта:

- едноканални;
- многоканални.

При едноканалните методи измерването на ъгловите координати се осъществява чрез сравнение на сигналите, приети от една антена, изменяща своето положение в пространството (например сканираща по линеен закон както е при ЗРК С-75М, С-125М). Приеманите сигнали са модулирани по амплитуда. Информацията за ъгловите координати на целта се съдържа в закона на модулация на сигналите от целта.

Недостатъците на този метод са:

- понижаване на точността на измерване на ъгловите координати поради флукуацията на ефективната отразяваща повърхност (ЕОП) на целта;
- понижаване на точността на измерване на ъгловите координати поради изменение на разстоянието до целта;
- понижаване на точността на измерване на ъгловите координати поради изменение на свойствата на обкръжаващата среда;

- чувствителност към смущения, модулирани по амплитуда с честота, кратна на честотата на сканиране, т.е. увличащи по ъгъл смущения;
- появяване на грешки при измерването на координатите, свързани с дискретизацията при обработката на информацията с честотата на сканиране.

При многоканалните методи за пеленгация измерването на координати се осъществява чрез сравнение на сигналите, приемани едновременно от две или повече диаграми на насоченост на антени.

Това осигурява:

- отстраняване на влиянието на флукуацията на сигналите върху точността при измерване на координатите;
- компенсация на грешките на измерването, свързани с дискретността на постъпване на информацията;
- нечувствителност на измерването към увличащи по ъглови координати смущения.

Многоканалните, а по често двуканалните методи се построяват на основата на амплитудното и фазовото сравнение на сигналите.

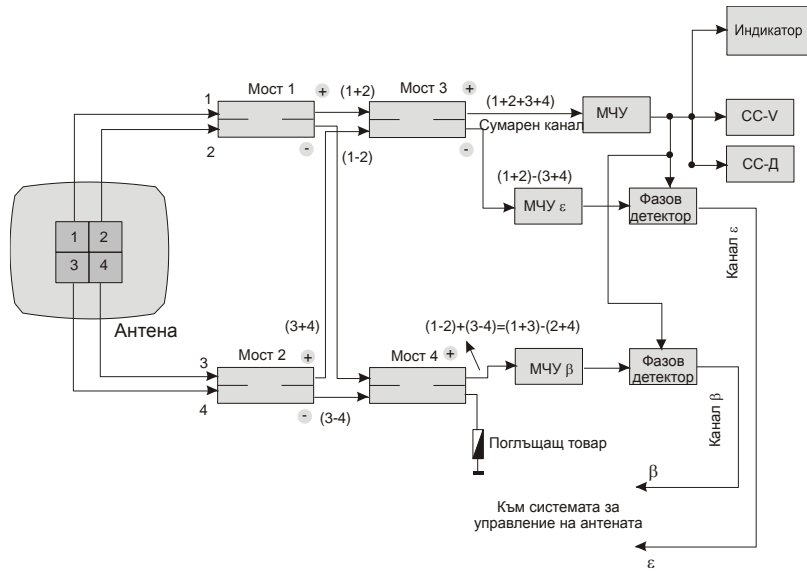
Потенциалната точност на двете сравнения е еднаква, но апаратурната реализация при амплитудното сравнение е по-проста.

Многоканалният метод на пеленгация има следните недостатъци:

- по-сложна реализация спрямо едноканалният метод;
- присъща на метода грешка на пеленговането поради неидентичност на каналите.

В пеленгаторите на РПЦ и ГСН се използва метода на двуканалната пеленгация. По-точно методът на равносигналното направление с амплитудно сравнение на сигналите (в ГСН се използва и амплитудно и фазовото сравнение на сигналите).

В пеленгационното устройство, чиято структурна схема е показана на фиг. 3. 2 по ϵ и β има два канала: сумарен и разликов. Тъй като сумарният канал може да се използва като опорен и в пеленгатора по ϵ и по β , то в РПЦ е достатъчно да има 3 бр. канали.



Фиг. 3. 2, а. Реализация на моноимпулсна система за определяне на ъгловите координати

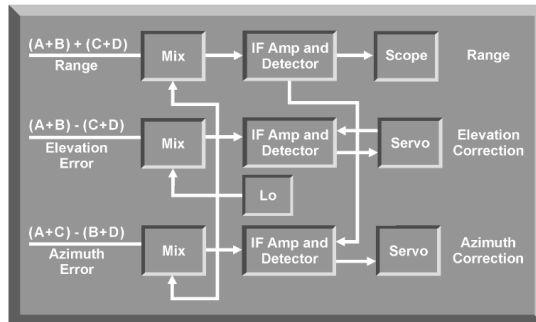
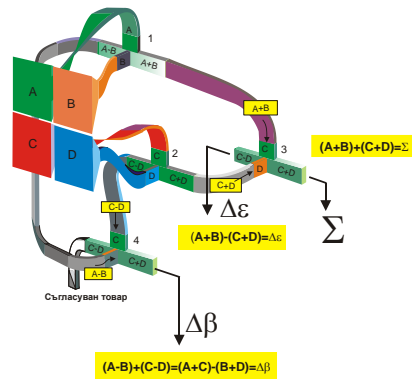


Figure 7-15. Monopulse Tracking Loops



Фиг. 3. 2, б Приемни рупори и реализация на моноимпулсия метод за определяне на ъгловите координати в антената на РПЦ

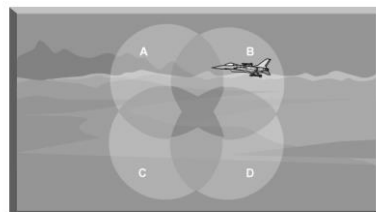


Figure 7-16. Monopulse Elevation Tracking Error

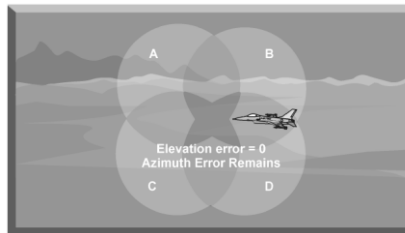


Figure 7-17. Monopulse Elevation Track

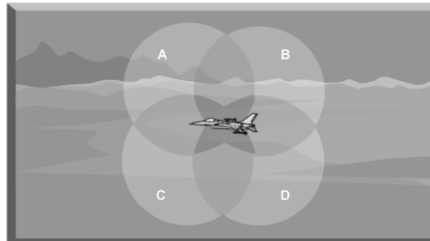


Figure 7-18. Monopulse Azimuth Track

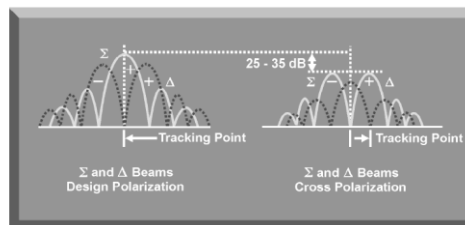
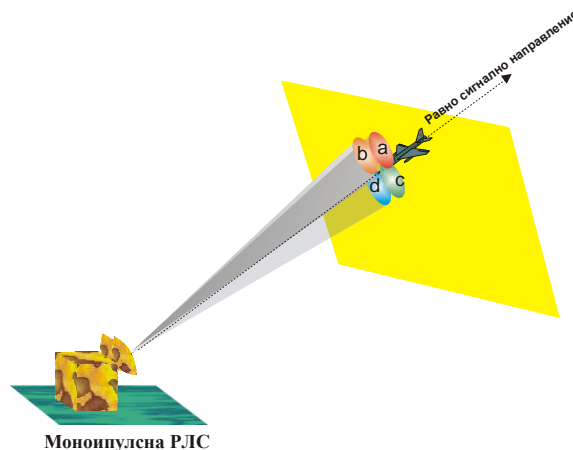
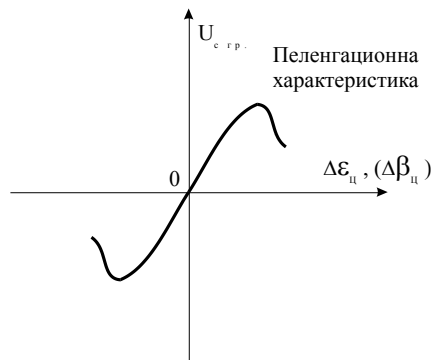


Figure 11-22. Cross-Polarization Antenna Pattern

Принципът на работа на пеленгатора е следният. При отклонение на целта на даден ъгъл по отношение на равносигналното направление (то съвпада с оста на антената) на изхода на разликовия канал по тази координата се изработва сигнал на грешката в съответствие с пеленгационната характеристика (фиг. 3. 3).

На фазовия детектор постъпват два сигнала - разликов и сумарен. Последният е необходим като опорен, позволяващ по фазовото съотношение между него и разликовия сигнал да се определи знака на отклонението на посоката на целта спрямо равносигналното направление. Изработваният сигнал на грешката от фазовия дискриминатор се използва за управление на приводите на антените за да се удържа целта на равносигналното направление.





Фиг. 3. 3 Пеленгационна характеристика

Особеностите на построяването на двуканалния пеленгатор са:

- приетите мерки за осигуряване на идентичност на сумарния и на разликовите канали;
- осигуряване в сумарния канал амплитуда на сигнала от целта, независимо от разстоянието до целта.

Като реализация идентичността на каналите е предназначена за да се избегне ефекта на “разноканалността”, която довежда до изместване на пеленгационната характеристика на пеленгатора и като следствие появяването на грешка при пеленговането. В РПЦ и ГСН тази задача е решена чрез използване на един главен усилвател, който осигурява основното усиление на сигнала от целта на всичките три канала. За осъществяване на това преди главния усилвател са поставени устройства за временно уплътнение на сигналите от трите канала, а след него – устройства за тяхното поканално разделяне.

Амплитудата на сигнала от целта на изхода на изваждащото устройство зависи от грешката на пеленга на целта и от разстоянието до целта. Във връзка с това, ако не се осигури независимост на амплитудата на сигнала от целта от разстоянието то сигналът на грешката, управляващ антените ще е нееднозначен. Неговото изменение за сметка на изменението на разстоянието до целта ще доведе до нестационарност на пеленгационната характеристика. Нека покажем това.

Приетите от парциалните антени сигнали се описват от изразите:

$$U_1(t) = U(D_{ц})F(\theta_0 - \Delta\epsilon)\sin \omega_c t \quad (1)$$

$$U_2(t) = U(D_{ц})F(\theta_0 + \Delta\epsilon)\sin \omega_c t, \quad (2)$$

където: $U(\ddot{A}_\delta)$ -коэффициент, определящ зависимостта на амплитудата на сигнала от разстоянието;

$F(\theta)$ - нормирана ДН на антената.

На изхода на амплитудния фазов детектор амплитудата на сигнала на разликовия канал е равна:

$$U_{\Delta\epsilon} = K_\epsilon(U_1 - U_2) = K_\epsilon U(\ddot{A}_\delta)[F(\theta_0 - \Delta\epsilon) - F(\theta_0 + \Delta\epsilon)], \quad (3)$$

където: K_ϵ - коэффициент на усиление на разликовия канал.

Опорният сигнал на фазовия детектор се описва от израза:

$$U_{\Sigma} = K_{\Sigma}(U_1 + U_2) = K_{\Sigma}U(\ddot{A}_{\delta}) [F(\theta_0 - \Delta\varepsilon) + F(\theta_0 + \Delta\varepsilon)]. \quad (4)$$

Коефициентът на усилване на сумарния канал е равен на

$$K_{\Sigma} = \frac{U_{\Sigma}}{U_1 + U_2} = K_{\varepsilon}. \quad (5)$$

Тогава $U_{\Delta\varepsilon} = U_{\Sigma} \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2} = U_{\Sigma} \frac{F(\theta_0 - \Delta\varepsilon) - F(\theta_0 + \Delta\varepsilon)}{F(\theta_0 - \Delta\varepsilon) + F(\theta_0 + \Delta\varepsilon)}$. (6)

Амплитудата на изхода на фазовия детектор е пропорционална на амплитудата $U_{\Delta\varepsilon}$, зависеща от U_{Σ} , който е функция на $\Delta\varepsilon$ и Дц. По такъв начин, сигналът на грешката на пеленгатора е функция на Дц. За да се изключи тази зависимост, главният усилвател се обхваща от система за автоматическо регулиране на усилването (АРУ) с голям динамически диапазон, превишаващ 70 dB. По такъв начин се ликвидира изменението на сигналите в каналите при изменение разстоянието до целта.

2.6 Нониусен метод за измерване на разстоянието

Използването на фазокодово манипулирани сигнали (ФКМС) разширява тактическите възможности на РЛС с непрекъснато излъчване.

Този режим позволява:

- да се измерва разстоянието до целта;
- да се осъществява съпровождане на една цел от състава на групата;
- да се осъществява съпровождане на целта при наличие на смущаващи отражения от земната повърхност;
- разпознаване на неретранслационни смущения.

Информацията за разстоянието до целта се съдържа във временната задръжка на кода на отразения от целта сигнал спрямо сондиращия. Измерването на разстоянието до целта по същество се заключава в измерване на тази временна задръжка. Тъй като периодът на ФКМС е по-малък от периода на следване на импулсите r_0 (иначе те се наричат импулси за запуск на РЛС), то истинската задръжка на отразения от целта сигнал не може да се измери еднозначно както при импулсните РЛС. По такъв начин, използването на код с период на такта, по-малък от периода на следване на импулсите r_0 довежда до нееднозначност при измерването на разстоянието. Това обстоятелство довежда до стесняване на областта на обзор по разстояние, характеризиран от импулсите r_0 до размера на тактовия период T_T .

Необходимостта от обзора по разстояние е определена от факта, че диапазона на захват на следящата система по разстояние е по-тесен от областта на възможните стойности на задръжката на отразения сигнал. Лентата (диапазон) на захват на следящата система по разстояние за приетия ФКМС се определя от ширината на корелационната функция. Тази ширина е равна на $2\tau_g$ (на нулево ниво). Диапазонът на възможните задръжки на сигнала с отчитане на периодичността на корелационната функция е равен на T_T е

$$0 \leq t_3 \leq T_T = n \tau_g .$$

където: n – брой на дискретите в тактовия интервал.

По такъв начин, при включване на следящата система по разстояние тя не може да осигури автоматическо съпровождане на целта по разстояние (АС-Д) без предварително насочване. Обзорът на пространството, насочването на следящата система по разстояние и автоматическо съпровождане на целта по разстояние се извършват последователно.

Възможни са последователен и паралелен методи за обзор по разстояние. Обзорът се осъществява чрез плавното изменение във времето на задръжката на кода на хетеродина на време τ (корелационен метод) на приемника за обзор (ПО) по отношение на кода на приетия сигнал. Скоростта на обзора се определя от скоростта на изменение на τ . Тази скорост трябва да бъде такава, така че за времето на преобразуването на сигнала от целта, т.е. за времето, когато кодовете на сигнала от целта и на хетеродина съвпадат, сигналът от целта да може да заеме установена стойност ($t_{уст.тс}$) в теснолентовите филтри (ТФ). Тъй като лентата на ТФ е $\Delta F_{ТФ} = (100 - 300) Hz$, следователно $t_{уст.тс} \approx (2 - 5) ms$ и $t_{обз.} \geq 15 t_{уст.тс} = (50 - 90) ms$.

При паралелният обзор са необходими N (РЛС 1РЛ136 - 4 канала) канала за корелационна обработка:

$$N = \frac{T_T}{\tau_g} .$$

Във всеки от каналите кодът на хетеродинния сигнал по τ е фиксиран, и тази задръжка във всеки от каналите е различна. Ако се появи сигнал от целта, то обезателно ще се осъществи неговото преобразуване (в монохроматичен сигнал) във един от каналите. Опишването на каналите е синхронизирано с хоризонталната развивка на индикатора за обзор.

При паралелният обзор по разстояние трябва да се изпълнява условието $t_{обз.} \geq 15 t_{уст.тс} + T_{опр}$,

където: $T_{опр}$ - период на “описването” на всички канали.

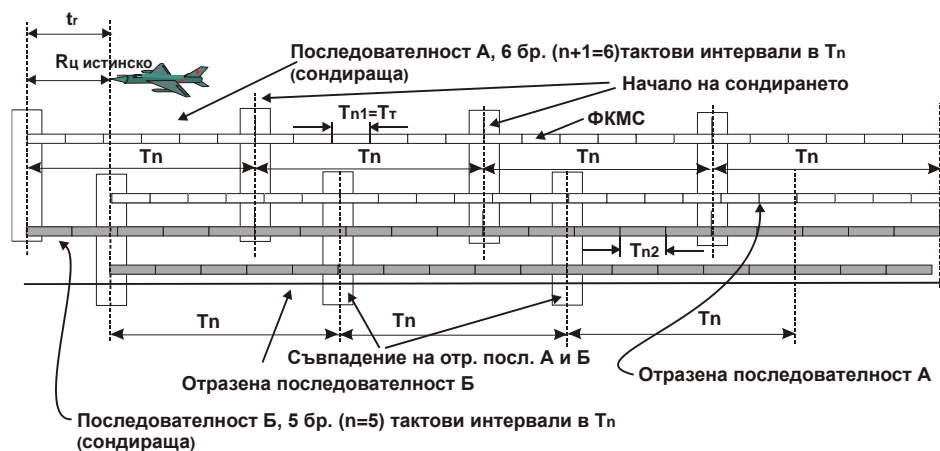
Но, при този метод се увеличава количеството на необходимата за обзор апаратура.

В РЛС обикновено се приема метод на последователен обзор в границите на тактовия интервал.

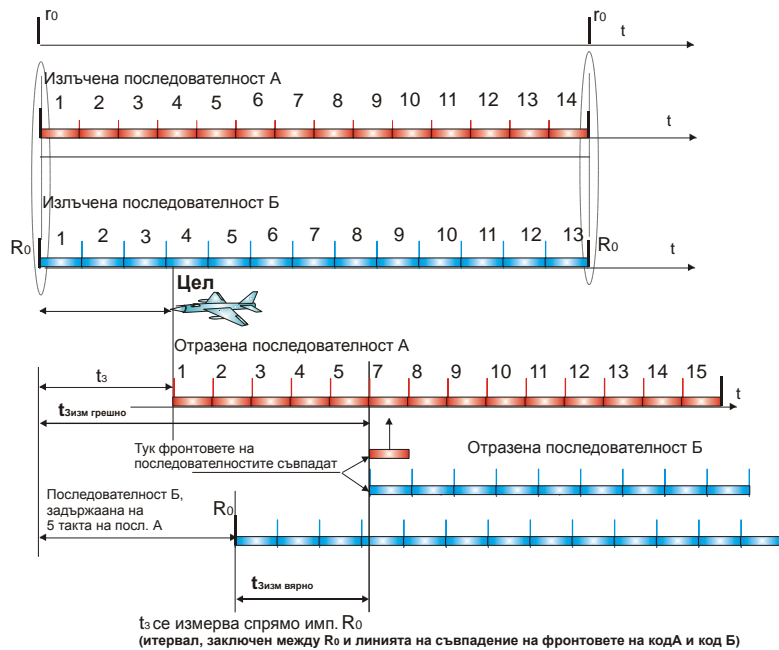
Известно е че, при $T_T < T_{r_0}$ обзорът по разстояние е достатъчно да се осъществи в границите на тактовия интервал. За обзор в този интервал кодът на хетеродина изменя своята задръжка спрямо кода на сигнала от целта (или сигналите, ако целите са няколко) във времето по линеен закон в границите от 0 до T_T . Задръжката на кода на хетеродина по отношение към кода на сигнала от целта може да започне от произволно изходно положение, но е необходимо тя да се увеличава до стойността на T_T . Обаче, за да се осигури насочването на изходното положение на кодът на хетеродина на приемника за обзор (ПО) кодът на хетеродина на ПО се „привързва” към положението на хетеродина

на приемника за съпровождане (ПС). Ако положението на кодът на хетеродина на ПС обозначим с r_c , то кодът на хетеродина на ПО с $r_{обз}$ се премества спрямо r_c вляво и вдясно по оста на задръжката на $\frac{T_T}{2}$. Периодът на обзор е равен на стотици ms, а резултатите се изобразяват на индикатор за захват.

Известно е, че използването на ФКМС не осигурява еднозначност при определянето на разстоянието до целта при РЛС с непрекъснато излъчване. Това може да се избегне ако се използват две импулсни последователности с различни периоди на повторение T_{n1} и T_{n2} отличаващи се на ΔT . При това временната задръжка t_3 се измерва в моментите на съвпадение на отразените сигнали на двете последователности (фиг. 3.4), а нееднозначността се избягва чрез задържане на втората кодова сондираща последователност (дискретно на размера на T_{TA} , фиг. 3.5).



Фиг. 3.4 При непрекъснатото излъчване на РЛС не се осигурява еднозначност при определянето на разстоянието до целта. Това се избягва с използването на две импулсни последователности с различни периоди на повторение T_{n1} и T_{n2} , отличаващи се на ΔT



Фиг. 3. 5 Диаграми, поясняващи нониусния метод. Неоднозначността се избягва чрез задържане на втората кодова (Б) сондираща последователност (дискретно на размера на $T_{T A}$)

Предимство на даденият метод е възможността за еднозначно определяне на разстоянието до целта при РЛС с непрекъснато излъчване.

За двата периода на следване на импулсите трябва да се изпълнява следните съотношения:

$$T_n = (n+1)T_{n1} = nT_{n2}, \quad (7)$$

$$\frac{(n+1)}{n} = 1 + \frac{1}{n} = \frac{T_{n2}}{T_{n1}}. \quad (8)$$

След преобразувания ще получим: $\frac{1}{n} = \frac{T_{n2}}{T_{n1}} - 1 = \frac{T_{n2} - T_{n1}}{T_{n1}} = \frac{\Delta T_n}{T_{n1}}.$ (9)

Тогава:

$$\frac{1}{n} = \frac{\Delta T_n}{T_{n1}}. \quad (10)$$

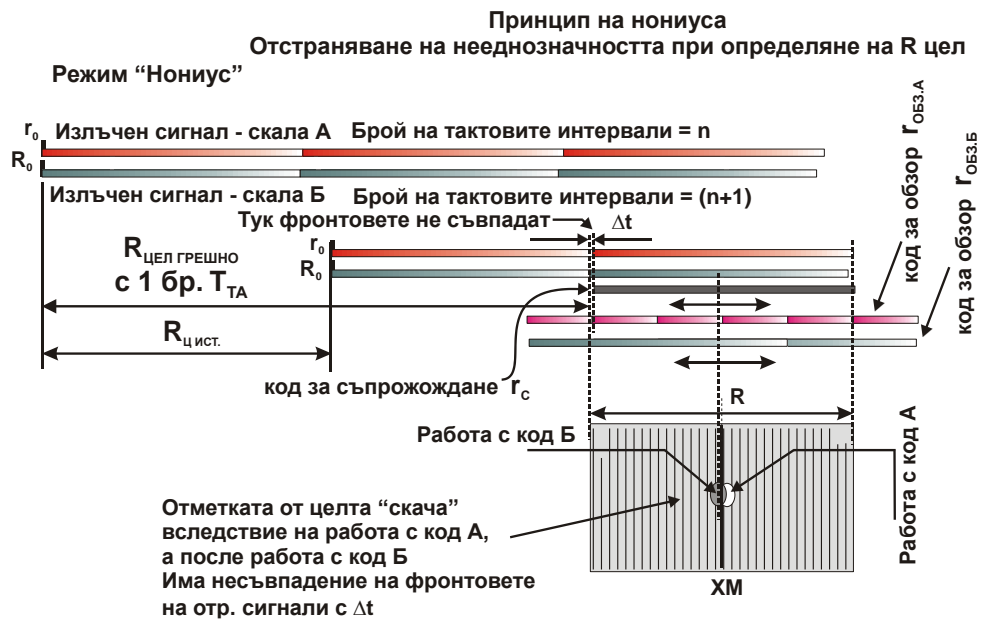
Нека $T_{n1} = 10 \mu S$ при това $R_{еднозн} = \frac{c \cdot T_{n1}}{2} = 1,5 \text{ km}$, т.е. много малко.

Например, необходимо, е $R_{еднозн.} = 150 \text{ km}$. Тогава:

$$n = \frac{150}{1,5} = 100,$$

$$\Delta T_n = \frac{T_{n1}}{n} = \frac{10}{100} = 0,1 \mu S. \quad (11)$$

От тук $T_{n2} = 10,1 \mu S$, и $R_{еднозн.} = 150 \text{ km}$.



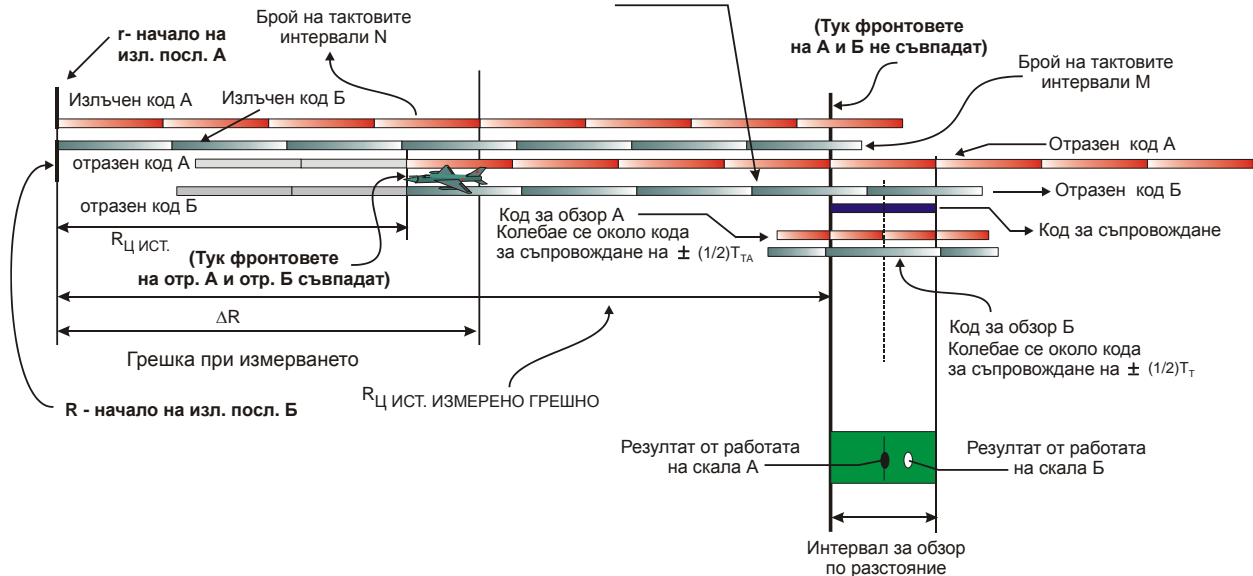
Фиг. 3. 6 Разположение на сигналите при нониусният метод за определяне на разстоянието (в типова РЛС). Нееднозначността трябва да се отстрани.

От временните диаграми за обзор по разстояние (фиг. 3. 6) се вижда, че при преместване на кода за обзор $r_{\text{обз}}$ той съвпада по τ с кода на отразения сигнал (от скала А). При това на изхода на приемника за обзор (ПО) се формира сигнал, който във вид на яркостна отметка (последователно при работа на скала А и скала Б) се изобразява на индикатора за захват. Вертикалната развивка на индикатора (развивката по разстояние) е синхронизирана с преместването на кода за обзор - $r_{\text{обз}}$ (колебае се около средното си положение на $\pm \frac{1}{2} T_{\text{ТА}}$). Затова положението на яркостната отметка по отношение началото на развивката по разстояние, т.е. по отношение долния край на индикатора (на фиг. 3. 6 за удобство на илюстрацията индикатора за захват е завъртян на 90°), дава представа за положението на кода на сигнала от целта по отношение на началото на отчитането на задръжката τ на кода на обзора $r_{\text{обз}}$. Вертикалният размер на индикатора за захват съответства на времето T_T .

За осигуряване насочването на приемника за (съпровождане) ПС при съвпадане на $r_{\text{обз}}$ с r_c се формира хоризонтална метка (XМ). На екрана на индикатора тя представлява хоризонтална линия, разполагаща се в средата на екрана. Процесът на насочването се заключава в преместване на кода за съпровождане r_c по оста на задръжката τ така, че яркостната отметка да съвпадне с XМ.

Операторът, измерващ разстоянието е съвпаднал кода за спровождаване с отметката от целта и е включил АС-Д. Измереното разстояние е грешно, т.е. трябва да се отстрани нееднозначността при измерването (метките на екрана скачат при преминаване от работа на скала А към работа на скала Б).

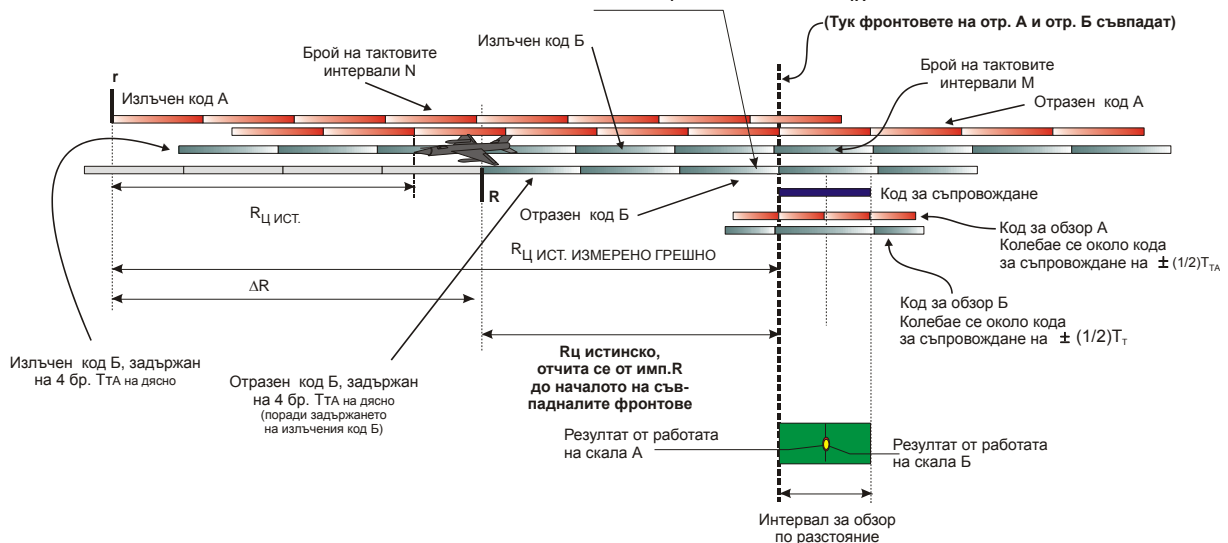
(За да се отстрани нееднозначността трябва код Б трябва да бъде изместен с $4бр. T_{ТА}$ на дясно)



Фиг. 3.7 Грешно измерено разстояние до целта (нееднозначността не е отстранена)

Операторът, измерващ разстоянието е съвпаднал кода за спровождаване с отметката от целта и е включил АС-Д. Измереното разстояние е вярно, т.е. Отстранена е нееднозначността при измерването (метките на екрана не скачат при преминаване от работа на скала А към работа на скала Б). Кодът на скала Б е задържан на 4 такта на скала А.

(Нееднозначността е отстранена чрез изместване изл. код Б с $4бр. T_{ТА}$ на дясно)



Фиг. 3.8 Вярно измерено разстояние до целта (нееднозначността е отстранена)

Тук е показано и как се отстранява нееднозначността при измерване на разстоянието до целта чрез излъчване на втора кодова последователност (Б), с различен от кодовата последователност (А) брой на тактовите интервали.

Кодът за обзор $r_{ОБЗ}$ както и преди е привързан към код r_C . При съвместване на отметката от целта с ХМ кода за спровождаване се съвместява с кода на приетия сигнал. На изхода

на преобразуващото устройство по разстояние (смесителя) на ПС ще се появи сигнал от целта (АКФ). След това може да се включи системата за съпровождане по разстояние. Формата на сигнала на изхода на преобразуващото устройство (смесителя) по разстояние в ПО се формира тогава, когато кодовете на хетеродина и на приетия сигнал съвпадат. При обзора, при изменение задръжката на кода на обзора съвпадането на кодовете на хетеродина и на целта се изменя от $-\tau_g$ до 0, а след това до $+\tau_g$. При това изходният сигнал ще повтори формата на корелационната функция. По такъв начин, на изхода на преобразуващото устройство по разстояние (корелатор) ще се формира триъгълен радиоимпулс. Това ще се получава при работа на РЛС с кодова последователност А, а след това и при работа на РЛС с кодова последователност Б.

Поради неотстранената нееднозначност при определянето на разстоянието отметката от целта ще „скача“ в ляво или дясно (при работа на скала А и после при работа на скала Б, фиг. 3. 7). За отстраняване на нееднозначността при определяне на разстоянието е необходимо да се задръжи кодовата последователност Б (на примера на 4 такта).

Временната задръжка, съответстваща на истинското разстояние до целта се отчита от началото на излъчване на кодова последователност Б, (импулс R на фиг. 3. 8) (задръжана на определен бр. тактови интервали на посл.А) до съвпадането на фронтите на отразените сигнали от скала А и от скала Б (фиг. 3. 8). Само тогава отметките от целта при работа на РЛС с кодова последователност А, а след това и при работа на РЛС с кодова последователност Б ще съвпадат, т.е. разстоянието ще е измерено правилно (отстранена нееднозначност).

Необходимо е да подчертаем, че операторът не вижда съвпадането на фронтите на отразените сигнали. Операторът наблюдава екрана и когато яркостните отметки не скачат това е гаранция, че нееднозначността при определянето на разстоянието до целта е отстранена. В типова РЛС за отстраняване на нееднозначността при определянето на разстоянието до целта се използват 3 бр. нониусни скали, „Груб нониус“, „Среден нониус“ и „Точен нониус“. Съответно броят на тактовите интервали $n = var$. Времето за отстраняване на нееднозначността при определянето на разстоянието до целта може да продължи до 30 s.

Заклучение

В социалните мрежи някои лаици характеризират военната техника на бившия СССР като изостанала, с малка ефективност (споменават се лопати, чипове от перални, как самолетът F-16 щял да обърне хода на войната в Украйна и други) и т.н. Желателно е всичките тези „коментатори“ (включително и тези, които уж се пишат интелектуалци) да се изказват по-скромно, особено ако знанията им са повърхностни. Само безпристрастният анализ може да даде точна оценка. Например до 1982 г. в бившия СССР за отбраната на Москва е стояла на въоръжение ЗРС за ПВО С-25 „Беркут“, (заместен от мобилните и модерни С-300XXX). Тази система С-25 е проектирана да отразява налетът на **1000** въздушни цели **едновременно**. Всеки ЗРК от състава на С-25 „Беркут“ е могъл да съпровожда и унищожава по **20 цели едновременно** (за справка МІМ-104 Patriot унищожава едновременно до 9 цели с ограничения, руският С-300XXX унищожава едновременно до 6 цели без ограничения).

ЗРС С-200 „ВЕГА“ е високоефективна система за далечно действие на ПВО.

Тази система е на въоръжение в редица страни: Азербайджан, Алжир, България, Индия, Иран – 100 установки, Казахстан, Латвия, Либия, Полша, Северна Корея – 24 установки, Сирия – 8 установки, Туркменистан, Узбекистан, Украйна, Беларус, Молдова, Русия, Унгария, Чехия.

Бойно използване:

Сирия

1983г. Сирийска ЗРС С-200, управлявана от съветски разчет унищожава 3 бр. израелски БПЛА MQM-74.

Март 2017 г. 4 бр. самолета на Израел влизат в Сирийското въздушно пространство. Обстреляни са от ЗРК С-200. Свален е един самолет.

Март 2017 г. ЗРК С-200 обстрелял с една ракета израелски самолет, намиращ се над територията на Ливан. Самолетът е свален. Впоследствие при ответен удар израелците унищожават РПЦ на С-200.

10 февруари 2018 г. С-200 стреля по самолет на Израел F-16. Самолетът е свален. Летците успяват да катапултират. Единият летец е тежко ранен.

14 април 2018 г. стрелба по самолети на САЩ, Великобритания и Франция. Изстреляни 8 бр. ракети. Няма свалени самолети.

17 септември 2018 г. Израел атакува ирански обекти в Сирия. С-200 по погрешка сваля самолет за радиоелектронно разузнаване Ил-20 на ВКС на Руската Федерация. Загиват всички 15 члена на екипажа на руския самолет.

22 април 2021 г. изстреляна ракета от сирийското ПВО загубва управление и лети около 200 km. в територията на Израел. Израелците, въпреки опитите си не са могли да свалят ракетата на С-200.

Либия

В 1986 г. С-200 „ВЕГА“ над залива Сидра унищожава 3бр. американски самолета А-6Е „Интрuder“ (или 3 бр. F-14 „Томкет“).

Руско-грузинска война — Грузия успява да сваля руски бомбардировач Ту-22М със ЗРК С-200.

Украйна

На 4 октомври 2001 г. украинската ПВО сваля пътнически самолет Ту-154, пътуващ от Тел Авив до Новосибирск. Загиват всички 78 души на борда. Все още не е изяснено дали самолетът е бил свален нарочно, или по погрешка.

Съществува версия (Украйна е признала), според която при разполагането на ЗРС С-200 „ВЕГА“ на полуостров Крим (тогава в пределите на Украйна) за тренировка на ПВО не е спазено определеното разстояние между отделните ЗРК.

Украинските ВС вече не са могли да използват полигоните в пустинята на Астраханска област). При това учение (при което е унищожен пътническият самолет Ту-154) украинското командване не е спазило необходимите изисквания за електромагнитна съвместимост поради ограничения в полуострова, вследствие на което втората ракета на единия С-200 (завършил стрелбата по мишена Ту-143 Рейс -подсветяването прекратено, намираща се на 37 km.) захваща пътническият самолет, „подсветяван“ от друг ЗРК С-200, тренирал по пътническият самолет и грешно разположен на по-малко разстояние от изискванията за електромагнитна съвместимост, поради което се е получило влияние на работата на единият комплекс върху другия.

Украйна е признала, че свалянето на Ту-154 е по нейна вина (на 4 октомври в Черно море е бил свален руският самолет Ту-154 от украинска ракета С-200, предаде ИТАР-ТАСС. Това са предварителните изводи на държавната комисия, която разследва причините за катастрофата, съобщи пред журналисти в Сочи секретарят на украинския Съвет за национална сигурност и отбрана Евгений Марчук.). Съществуват и други версии (<https://bravoplanner.ru/bg/goroda/tu-154-4-oktyabrya-katastrofa-v-nebe-nad-chernym-morem-ukraina/>).

Литература:

1. <http://historykpvo.narod2.ru/> Главная история техники ПВО. ЗРС С-200 „ВЕГА”;
2. http://library.tuit.uz/lectures/TPS/osn_teorii_radio_sistem.htm;
3. <http://historykpvo.narod2.ru/> Главная история техники ПВО. Учебник за ЗРС С-200 „ВЕГА”;
4. Теоретични основи на системите за управление на безпилотни летателни апарати – 1 ч. ВИ 2001 г.;
5. <https://www.mediapool.bg/ukraina-prizna-che-neina-raketa-e-svalila-tu-154-news3153.html>