

АНАЛИЗ СПОСОБОВ УМЕНЬШЕНИЯ РАБОТНОГО ВРЕМЕНИ ЗЕНИТНЫХ РАКЕТНЫХ СИСТЕМ СРЕДНЕЙ И МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ПОМЕХ И ВЫСОКОТОЧНОГО ОРУЖИЯ

С.А. Горшков, И.В. Чигирь

Данная статья посвящена способам уменьшения рабочего времени зенитных ракетных систем средней дальности в условиях применения противником массированного налета крылатых ракет и противорадиолокационных ракет с любых направлений. Рассмотрены возможности применения дополнительного зондирующего сигнала в радиолокационной станции кругового обзора и нового критерия завязки трассы на пункте боевого управления командного пункта зенитной ракетной системы.

Введение

Начиная с 25 апреля 1953 года – со дня рождения нового вида вооружения противовоздушной обороны (ПВО), которое стало способным эффективно противостоять самолетами противника днем и ночью, в любых условиях мы можем наблюдать резкое возрастание возможностей ПВО. Появление этого вида оружия побудило высокие темпы развития возможностей средств воздушного нападения (СВН) противника [12].

Все самые передовые технологии своего времени внедрялись в развитие противоборствующих сторон. На появление высотных объектов, создатели зенитного ракетного оружия отвечали доработанным двигателем зенитных управляемых ракет (ЗУР), на применение помех – доработками в аппаратуре и появлению возможностей отстройки от этих помех, расширение класса СВН противника привело к появлению огромного количества различных типов зенитных ракетных систем (ЗРС) [3].

На сегодняшний день возможности СВН противника простираются от предельно малых высот с возможностью огибания рельефа местности до высот космоса, от способности зависания в воздухе и до гиперзвуковых скоростей в сочетании с огромным количеством вариантов огневого подавления всех источников излучения. Актуальные требования, которым должны соответствовать современные зенитные ракетные системы это: многоканальность, мобильность, многофункциональность, возможность отстройки от различного рода помех, оперативное реагирование на изменение воздушной обстановки [4].

Выполнение последнего требования достигается сокращением рабочего времени ЗРС и представляет огромный практический интерес. В современных условиях наибольшую опасность для подразделений ЗРВ представляют СВН, летящие на малых и предельно малых высотах с огибанием рельефа местности, а также разделяющиеся скоростные цели, такие как противорадиолокационных ракет (ПРР) [5]. Для уничтожения подобного класса целей существует острая необходимость снижения рабочего времени (времени реакции) ЗРС. Сделать

так, чтобы зенитная ракетная система мгновенно реагировала на изменение обстановки, не представляется возможным, а вот адаптировать работу некоторых элементов системы под складывающуюся обстановку и тем самым повысить эффективность решаемых задач мы можем и должны [6].

Возможности современных зенитных ракетных систем средней дальности

Анализ возможностей современных ЗРС на примере С-300В по уничтожению ракет-мишеней, имитирующих современные и перспективные СВН противника показывает, что ЗРС справляются с поставленными задачами уничтожения удаленных целей, летящих на средних и больших высотах. Однако существуют определенные трудности боевой работы по низколетящим целям (НЛЦ) и ПРР запущенным с дальностей до 70 км, т.к. промедление в 3-4 секунды в действиях боевого расчета может привести к невыполнению боевой задачи.

Проанализируем составляющие работного времени:

$$T_{зрс} = T_{зтр} + T_{пр} + T_{цз} + \max(\tau_{бр}, \tau_{ант}) + T_{ас} + T_{оп} + T_{ид} + T_{нту} + T_{подг} \quad (1)$$

где $T_{зтр}$ – время завязки трассы;

$T_{пр}$ – время оценки обстановки и принятия решения;

$T_{цз}$ – время выдачи целеуказания;

$\tau_{бр}$ – время перевода МСНР в режим «Боевая работа»;

$\tau_{ант}$ – время включения «высокого» МСНР;

$T_{ас}$ – время захвата цели на автосопровождение;

$T_{оп}$ – время на опознавание цели;

$T_{ид}$ – время определения исходных данных для стрельбы;

$T_{нту}$ – время назначения ПУ для обстрела, вида огня;

$T_{подг}$ – время подготовки ракеты.

Общее работное время (время реакции) ЗРС для условий одиночной аэродинамической цели будет составлять от 65 до 78 секунд [8]. Если условия воздушной обстановки ухудшаются, то общее работное время увеличивается. Больше всего времени затрачивается на завязку трассы на (командном пункте) КП ЗРС [2]. Поэтому в дальнейшем были рассмотрены принципы обзора пространства и критерии завязки трасс, реализованные на КП ЗРС.

Процедуры обнаружения, реализованные в радиолокационной станции кругового обзора (РЛС-КО) и критерии завязки трассы пункта боевого управления (ПБУ), позволяют решать поставленные задачи для удаленных целей, летящих на средних и больших высотах. Существуют определенные трудности своевременной завязки трассы на КП ЗРС и выдачи целеуказания (ЦУ) на огневое подразделение по низколетящим целям, таким как крылатые ракеты. Но гораздо большую трудность представляет работа в условиях применения противником ПРР и РЭП.

Темп обзора имеющихся программ РО-1 и РО-3 (рисунок 1) достаточно длительный (таблица 1).

Таблица 1

Основные характеристики программ обзора

Программа РО	Период обзора, с	Дальность обнаружения, км	Границы зоны обнаружения	
			по β , град	по ϵ , град
РО-1	12	300	360	45
РО-2	6	150	360	15
РО-3	12	300	360	20
РО-2 + ПЗ-1 ($\Delta\beta=60^\circ$)	7	150 300	0...360 0..60	0...15 0..45

Жесткие критерии завязки трасс, особенно если предстоит решение задач обнаружения низколетящих целей, не позволяют зенитному ракетному подразделению уничтожать цели на дальней границе зоны поражения с высокой эффективностью.

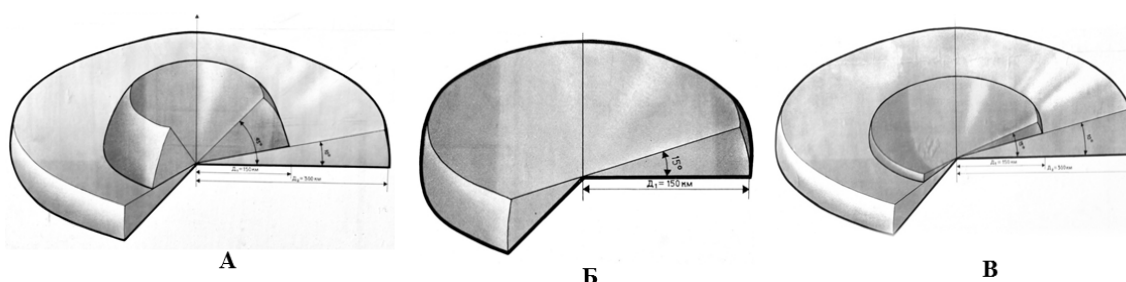


Рис.1. – Программы регулярного обзора РЛС-КО
А) РО-1, Б) РО-2, В) РО-3

Для обзора пространства с более высоким темпом обновления информации существует программа РО-2, однако она имеет один существенный недостаток - граница зоны обнаружения по ϵ для ситуации применения противником ПРР, очень мала [8]. Применение программ замедления (рисунок 2) позволяет исправить ситуацию, но только лишь для условий, когда заранее известен сектор применения противником ПРР [9].

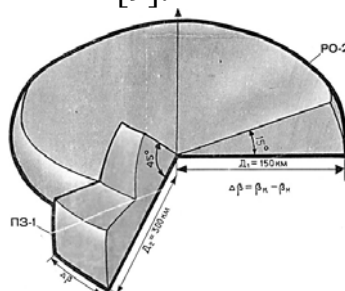


Рис.2. – Программы регулярного обзора с включенной программой замедления РО-2+ПЗ-1

На ПБУ, в свою очередь, реализованы очень “жесткие” критерии (таблица 2) завязки трассы и для их реализации необходимо много времени (с темпом обновления информации 7 сек это время составляет не менее 21 секунды) [2].

Таблица 2

Критерии захвата трассы на сопровождение, реализованные на ПБУ

Критерий	Условия применения критерия
«3 из 4» (с обязательной второй)	при $H_{ц} \leq 30$ км, дальности свыше 70 км и цель не сопровождается оператором поста РЛР
«3 из 3»	при $H_{ц} \leq 30$ км, дальности менее 70 км и цель не сопровождается оператором поста РЛР
«2 из 2»	при $H_{ц} > 30$ км и цель не сопровождается оператором поста РЛР

Подобные условия обстановки вынуждают использовать для вскрытия полета низколетящих целей станции наведения ракет (СНР) в определенных секторах, что в свою очередь существенно увеличивает время излучения СНР в пространство, тем самым еще больше демаскируя подразделения зенитных ракетных войск (ЗРВ). Применение СНР для автономного поиска ПРР без предварительной информации о них неэффективно.

Целью данной статьи является адаптация работы зенитных ракетных систем к условиям массированного налета КР и ПРР с любых направлений.

Выбор параметров дополнительного зондирующего сигнала

Для достижения поставленных целей предложено использование еще одного вида зондирующего сигнала в РЛС-КО помимо ЛЧМ и применение новых критериев завязки трасс на ПБУ.

Исходя из опыта локальных войн и военных конфликтов, противник активно применяет ПРР с любых направлений, высот и дальностей без входа в зону поражения ЗРС.

Квазинепрерывные сигналы (КНС) обладают хорошей разрешающей способностью по скорости. Хорошее разрешение обусловлено сравнительно большой длительностью обрабатываемой пачки импульсов [1]. Однако использование только квазинепрерывного сигнала в РЛС обзора существенно ухудшает ее возможности по обнаружению далеких целей. Кроме того, неоднозначности по дальности и скорости сводят на нет все преимущества квазинепрерывного сигнала при обнаружении целей в зоне пассивных помех. Применение КНС не приведет к нарушению временного баланса станции, т.к. будет использоваться не на всей дистанции, а на дальности до 70 км [10].

Для обеспечения возможности применения КНС были заданы определенные условия: устойчивая работа радиопередающего устройства (должно выполняться равенство средних и импульсных мощностей разных зондирующих сигналов); скорости СВН противника должны определяться

однозначно; согласованность ширины спектра КНС с полосой пропускания радиоприемного устройства; сохранение временного баланса работы РЛС (реализация процедуры с КНС не должна превышать время реализации с Л2 (ЛЧМ с длительностью 46 мкс)).

Исходя из данных условий были проведены расчеты параметров КНС и сделаны выводы о применимости КН сигнала в РЛС-КО с параметрами представленными в таблице 3.

Таблица 3

Расчет параметров квазинепрерывного сигнала

УСЛОВИЕ	РАСЧЕТ	РЕЗУЛЬТАТ
1 УСЛОВИЕ (к периоду повторения) равенство средних и импульсных мощностей		
$P_0^{кн} \cdot \frac{\tau_u^{кн}}{T_{п}^{кн}} = P_0^{л1} \cdot \frac{\tau_u^{л1}}{T_{п}^{л1}}$	$T_{п}^{кнс} = \frac{T_{п}^{л1} \cdot \tau_u^{кн}}{\tau_u^{л1}} \rightarrow \frac{1250 \cdot 0.2 \cdot 10^{-12}}{23 \cdot 10^{-6}} = 10.8 мкс$	$T_{п}^{кнс} = 10.8 мкс$
2 УСЛОВИЕ (к периоду повторения) однозначного измерения радиальной скорости		
$T_{п}^{кнс} \leq \frac{\lambda}{4 \cdot V_{max}}$	$T_{п}^{кнс} \leq \frac{0.1}{4 \cdot 1200} = 20 мкс$	$T_{п}^{кнс} \leq 20 мкс$
3 УСЛОВИЕ (к длительности импульса) согласованность с полосой пропускания радиоприемного устройства		
$\Delta f_u^{лчм} \geq \Delta f_u^{кн}$	$\tau_u^{кн} \leq \frac{1}{\Delta f_u^{лчм}} = \frac{1}{5 \cdot 10^{-6}} = 0.2 мкс$	$\tau_u^{кн} = 0.2 мкс$
4 УСЛОВИЕ (к длительности пачки) сохранение временного баланса		
$T_{пп}^{кн} \leq T_{п}^{л2}$	интервал обработки необходимо сдвигать относительно начала зондирования и сдвиг должен быть достаточным, чтобы все обрабатываемые импульсы могли содержать сигнал, отражённый от наиболее удалённого объекта	$\tau_{пач}^{кн} = 2 мс$

Реализация данного предложения позволит за один обзор оценить дальность и радиальную скорость цели. Это уменьшит время завязки траектории, поскольку для приближенной оценки скорости цели достаточно одной отметки. А при оценивании скорости по измерениям координат необходимо иметь не менее двух отметок. Дополнение измерений координат данными о радиальной скорости обеспечивает более точное оценивание параметров траектории, особенно при интенсивном маневрировании цели [7].

Использование высоких частот повторения позволит добиться однозначного измерения радиальной скорости при неоднозначном измерении наклонной дальности до цели. Последняя будет измерена в предварительном зондировании с помощью сложного импульсного сигнала (ЛЧМ) достаточно большой длительности [10].

Выбор критерия завязки трассы

Алгоритм завязки траектории по критерию «2/м» (два из m) совместно с алгоритмом подтверждения (окончательного обнаружения) траектории по критерию «l/n» (l из n) образуют объединенный алгоритм обнаружения траектории по критерию «2/м+l/n». Важным требованием к любому алгоритму автоматической завязки траектории является уменьшение времени формирования траектории после захода цели в зону обзора РЛС. В тоже время алгоритм должен предотвращать завязку ложных траекторий, обусловленную ложными отметками.

Проведены расчеты вероятностей обнаружения ложной траектории (формула 2) и вероятностей обнаружения истинной траектории (формула 3) для одноэтапных процедур.

$$F_{cp} = F_{pez} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^k (1 - m_{обн} \cdot F) \right) \cdot \sum_{i=1}^n C_n^i \cdot (m_{подтв} \cdot F)^i \cdot (1 - m_{подтв} \cdot F)^{n-i} \quad (2)$$

$$D_{cp} = \sum_{i=2}^m C_m^i \cdot D^i \cdot (1 - D)^{m-i} \cdot \sum_{i=1}^n C_n^i \cdot D^i \cdot (1 - D)^{n-i} \quad (3)$$

где F_{pez} – результирующая в зоне обзора условная вероятность ложной тревоги;
 $m_{обн}$ – среднее число элементов разрешения в стробе обнаружения;
 $m_{подтв}$ – среднее число элементов разрешения в стробе подтверждения;
 F – условная вероятность ложной тревоги в одном элементе разрешения;
 D – условная вероятность правильного обнаружения в одном элементе разрешения [11].

Проанализированы критерии представленные в таблице 4 (темно-серым помечены уже реализованные, светло-серым - предлагаемый). Сделаны выводы о том, что использование более “мягкого” критерия, такого как “2/3”, приводит к существенному увеличению вероятности обнаружения ложной траектории. Однако применение двухэтапных процедур зондирования различных сигналов (т.е. решение о наличии/отсутствии цели в заданном угловом положении принимается по результатам двух последовательных этапов зондирования различными типами сигналов, причем применение второго – зависит от результатов первого), позволит существенно снизить вероятность обнаружения ложной траектории (таблица 5). При этом вероятность обнаружения истинной траектории уменьшится незначительно (формулы 4, 5).

$$F_{cp_2} = F_{pez} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - m_{обн} \cdot F \cdot m_{обн_в} \cdot F_в) \right) \quad (4)$$

$$D_{cp_2} = \sum_{i=2}^m C_m^i \cdot (D \cdot D_в)^i \cdot (1 - D \cdot D_в)^{m-i} \quad (5)$$

где $F_в$ – условная вероятность ложной тревоги в стробах подтверждения;
 $m_{обн_в}$ – среднее число элементов разрешения в стробе подтверждения;
 $D_в$ – условная вероятность правильного обнаружения в стробе подтверждения.

Таблица 4

Вероятности обнаружения ложной и истинной траекторий для одноэтапных процедур

Критерии	Вероятность обнаружения ложной траектории	Вероятность обнаружения истинной траектории
«2/2+1/1»	$2.85 \cdot 10^{-10}$	0.512
«2/3+1/1»	$1.18 \cdot 10^{-9}$	0.717
«2/3+1/2»	$3.38 \cdot 10^{-9}$	0.86
«2/3+1/3»	$7.26 \cdot 10^{-9}$	0.889
«2/3»	$3.25 \cdot 10^{-4}$	0.896

Таблица 5

Вероятности обнаружения ложной и истинной траекторий для одноэтапных и двухэтапных процедур

Критерии	Вероятность обнаружения ложной траектории		Вероятность обнаружения истинной траектории	
	одноэтапные процедуры	двухэтапные процедуры	одноэтапные процедуры	двухэтапные процедуры
«2/3»	$3.25 \cdot 10^{-4}$	$8.05 \cdot 10^{-10}$	0.896	0.705

Применение таких процедур позволяет варьировать уровни порогов, ложных тревог и правильного обнаружения на каждом из этапов, тем самым меняя показатели качества обнаружения и завязки трасс.

Предложения по адаптации работы ЗРС к условиям применения противником КР и ПРР с любых направлений

Таким образом, в дальнейшем предлагается ввести в РЛС-КО новую программу обнаружения РО-4, сочетающую использование одного из импульсных ЛЧМ сигналов и пачки квазинепрерывных импульсов, которая позволит за один обзор оценить радиальную дальность и скорость маловысотной цели и будет адаптивна к условиям применения противником высокоточного оружия (ВТО) и ПРР.

При этом в нижнем положении луча диаграммы направленности используется процедура 1С2+КНС. Т.е. в данном угловом направлении назначается процедура 1С2. При получении эхо-сигнала от цели на дистанции до 70 км в данном угловом направлении назначается дополнительно процедура КНС. В остальных пятнадцати положениях будет использоваться процедура 1Л1/С2+КНС.

Процедура 1Л1/С2+КНС - двухэтапная. Сначала излучается один сигнал Л1 (ЛЧМ импульс длительностью 23 мкс) и производится анализ наличия эхо-сигнала на рабочей дистанции. При наличии эхо-сигнала на дистанции до 70 км в данном угловом направлении назначается дополнительно процедура КНС. При наличии эхо-сигнала на дистанции от 70 км до 150 км в данном угловом

направлении назначаются дополнительно два сигнала Л1, т.е. в целом выполняется процедура 1С2.

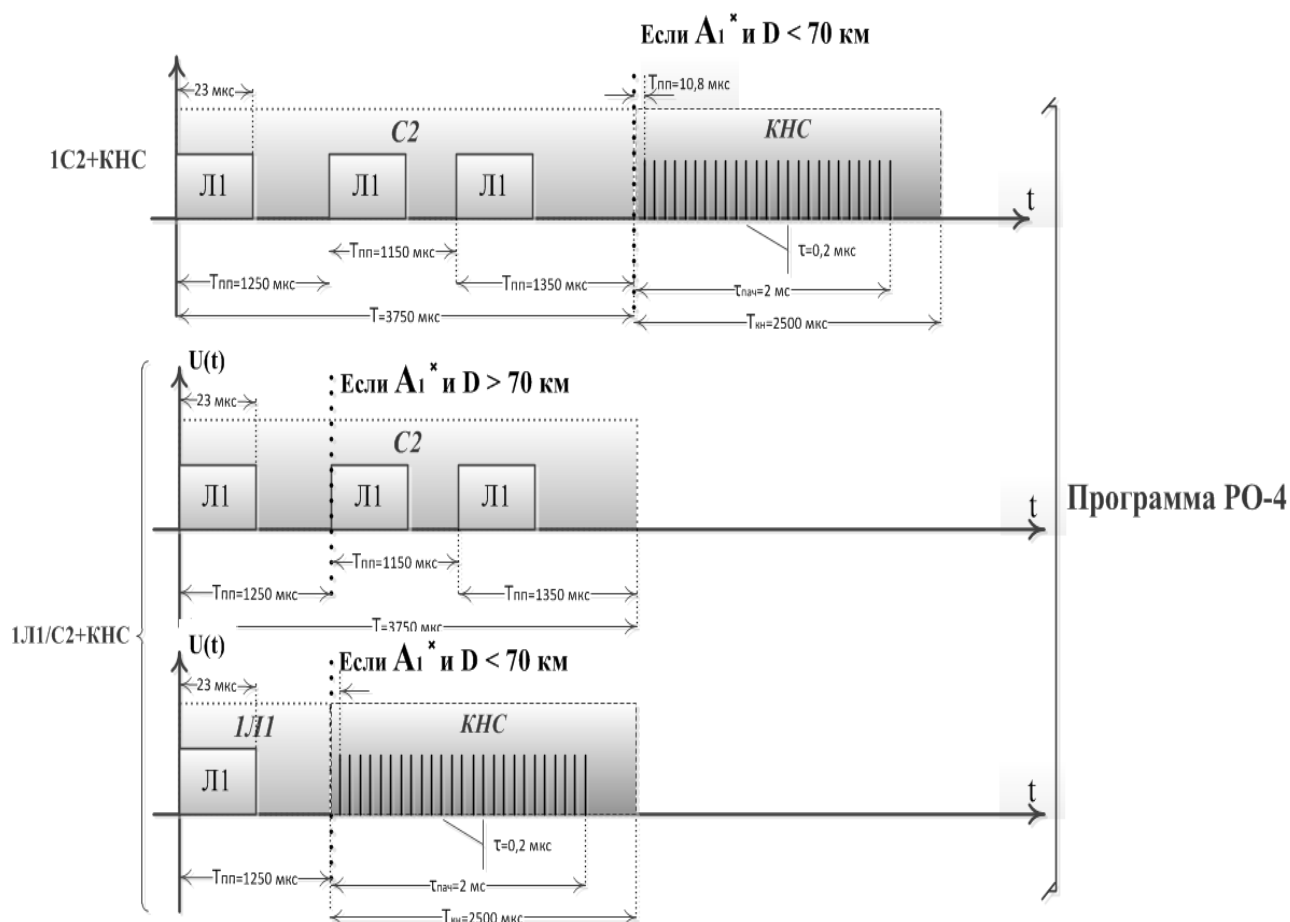


Рис.3. – Процедуры применяемые в программе РО-4

При одновременном наличии эхо-сигнала на дистанции до 70 км и от 70 до 150 км в данном угловом направлении назначается процедура КНС. Приоритет отдается более близким и скоростным целям. При использовании программы РО-4 РЛС-КО будет вести боевую работу в режиме ПСО-7 и обеспечивать дальность индикаторного обнаружения целей до 150 км в границах зоны обнаружения по β - 0...360°, ϵ - 0...28°. Это даст выигрыш в размерах просматриваемого пространства по углу места и позволит с большей эффективностью решать задачи обнаружения ПРР. Обзор будет производиться с периодом 7 с.

Анализ временных затрат на реализацию программы с использованием КН сигнала показывает сохранение временных затрат с выигрышем границ обзора пространства по углу места (таблица 6).

Работа РЛС-КО по программе РО-4, позволит на ПБУ использовать критерий «2/3», что «экономит» один обзор. Этот режим работы может быть рекомендован для отражения массивованного налета крылатых ракет и применения ПРР. Использование более «мягкого» критерия завязки трассы позволит увеличить дальность работы по НЛЦ. Это приведет к снижению рабочего времени (времени реакции) ЗРС на 15-18%, т.е. на время, равное примерно 7-12 секунд.

Сравнительные характеристики программ обзора

Программа РО	Период обзора, с	Время на реализацию программ РО, с	Дальность обнаружения, км	Границы зоны обнаружения	
				по β , град	по ϵ , град
РО-1	12	5.465	300	360	45
РО-2 + ПЗ-1 ($\Delta\beta=60^\circ$)	7	6.782	150 300	0...360 0..60	0...15 0..45
РО-4	7	6.684	150	0...360	0...28

Заключение

Реализация всех предложений позволит:

1. Снизить рабочее время ЗРС на 15-18%, т.е. на время, равное примерно 7-12 секунд;

2. Эффективно решать задачи обнаружения, завязки трасс и выдачи целеуказаний на КП ЗРС в условиях массированного применения противником КР и ПРР с любых направлений;

3. Использовать программу РО-4, в которой РЛС-КО будет обеспечивать дальность обнаружения целей до 150 км в границах зоны обнаружения по β - 0...360°, ϵ - 0...28°, обзор будет производиться с периодом 7 секунд;

4. Использовать новые процедуры обнаружения:

- 1С2+КНС – в нижнем положении луча программы РО-4;
- 1Л1/С2+КНС – в остальных 15-и положениях луча программы РО-4;
- использовать квазинепрерывный сигнал в качестве дополнительного зондирующего в РЛС-КО с параметрами:

$$T_{\Pi}^{КНС} = 10.8 \text{ мкс}, \tau_u^{КН} = 0.2 \text{ мкс}, \tau_{нач}^{КН} = 2 \text{ мс}.$$

5. Использовать процедуру захвата трассы на сопровождение «2/3» с вероятностью обнаружения истинной траектории 0.705 и вероятностью обнаружения ложной траектории $8.05 \cdot 10^{-10}$.

Список литературы

1. Гейстер, С.Р. Системное проектирование и расчет радиолокаторов ПВО. Ч.1. Выбор типа зондирующего сигнала / С.Р. Гейстер. – Минск: Изд. академии, 1998. – 222 с.
2. Изделия 9С457, 9С457-1. Техническое описание. Ч.2. Описание алгоритмов изделия. Книга 1. БА1.600.001 ТО1, 1982. – 358 с.
3. Информационный сборник, Боевые действия в Югославии (март – июнь 1999 г.), Ч.1, Применение новейших вооружений в войне НАТО против Югославии, Минск 2001. – 54 с.
4. Информационный сборник, Боевые действия в Югославии (март – июнь 1999 г.), Ч.2, Применение новейших вооружений в войне НАТО против Югославии, Минск 2001. – 54 с.

5. Информационный сборник, Боевые действия в Югославии (март – июнь 1999 г.), Ч.3, НАТО против Югославии: Послесловие, Минск 2001. – 50 с.
6. Неупокоев, Ф.К. Зенитная артиллерия и зенитные ракетные войска противовоздушной обороны. Ч.2. Зенитные ракетные войска противовоздушной обороны / Ф.К. Неупокоев. – Москва, Воениздат, 1994. – 224 с.
7. Охрименко, А.Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1 / А.Е. Охрименко. М: 1983. – 456 с.
8. Принципы построения и устройство узла целеуказания ЗРС С-300В. Ч.1 / А.Е. Козловский [и др.]; под общ. ред. А.Е. Козловского. – Минск, Издание академии, 2003. – 224 с.
9. Радиолокационная станция 9С15М. Техническое описание. Ч.1. Общие сведения. ЕФ1.005.017 ТО, 1983. – 97 с.
10. Трухачев, А.А. Радиолокационные сигналы и их применение / А.А. Трухачев. – Москва, Воениздат, 2005.– 320 с.
11. Ширман, Я.Д. Радиоэлектронные системы. Справочник / Я.Д. Ширмана, С. А. Горшкова [и др.]; под общ. ред. Я.Д. Ширмана. – 2-е изд. - Минск: Радиотехника, 2007. – 512 с.
12. Ямпольский, Л.С. Обобщённый анализ применения средств воздушного нападения ОВС НАТО при проведении военной операции в Югославии «Решительная сила» и в других локальных войнах в 90-х годах, Учебное пособие / Л.С. Ямпольский. – Ульяновск 2000. – 80 с.

Горшков Сергей Анатольевич, доцент кафедры радиолокации и приемопередающих устройств УО «Военная академия Республики Беларусь», кандидат технических наук, доцент, sedbox@mail.ru

Чигирь Иван Викторович, адъюнкт кафедры радиолокации и приемопередающих устройств УО «Военная академия Республики Беларусь», chigirivan@gmail.com