

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники

К.Д. Зайков, А.С. Аникин

**ОБНАРУЖЕНИЕ ЦЕЛЕЙ И ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ
РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ В РЕЖИМЕ ОБЗОРА НА
ИНДИКАТОРЕ КРУГОВОГО ОБЗОРА**

Методическое указание по лабораторной работе для студентов
радиотехнических специальностей

Томск

2023

УДК 621.396.677

ББК 32.845

3 17

Рецензент:

Захаров Ф.Н., доцент кафедры радиотехнических систем ТУСУР, кандидат
технических наук

Зайков, Кирилл Денисович

Обнаружение целей и измерение координат радиолокационной станцией в режиме обзора на индикаторе кругового обзора: методическое указание по лабораторной работе для студентов радиотехнических специальностей / К.Д. Зайков, А.С. Аникин — Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023. – 19 с.

Настоящие методические указания по лабораторным работам составлены с учётом требований федерального государственного образовательного стандарта высшего образования (ФГОС ВО).

Методические указания содержат краткие теоретические сведения об индикаторе кругового обзора, разрешающей способности и характеристиках обнаружения, описание программного обеспечения, порядок проведения лабораторных работ, а также контрольные вопросы для допуска к их выполнению.

Лабораторная работа выполняется на ЭВМ с помощью ПрЭВМ, имитирующей индикатор кругового обзора, включая имитатор цели и помех.

Одобрено на заседании каф. РТС, протокол № ___ от _____

УДК
621.396.677
ББК 32.845

© Зайков К.Д., Аникин А.С., 2023
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Поиск, обнаружение и определение координат цели РЛС кругового обзора	5
1.1 Поиск и обнаружение целей	5
1.2 Определение координат цели	5
2 Влияние индикаторных устройств на характеристики РЛС	6
2.1 Влияние системы оператора	6
2.2 Точность определения координат на индикаторе	7
2.3 Разрешающая способность	7
3 Характеристики обнаружения РЛС	9
4 Описание программного обеспечения	11
5 Задание на лабораторную работу	13
6 Контрольные вопросы	14
7 Список рекомендуемой литературы	15

Введение

В обзорных навигационных РЛС с индикаторами кругового обзора (ИКО) для измерения дальности до радиолокационных объектов используется импульсный метод. При импульсном методе в направлении объекта излучается короткий зондирующий импульс, а дальность до объекта измеряется по разности времён прихода и излучения этого импульса.

Индикаторное устройство радиолокатора предназначено для получения на экране электронно-лучевой трубки изображения кругового обзора пространства в полярных координатах и отображения пеленга на радиолокационный объект.

Линия развертки на экране РЛС вращается синхронно с вращением антенны. Одновременно на экране формируется масштабная сетка для измерения азимута и дальности цели. При облучении цели на входе приемника появляются отраженные цели сигналы, которые усиливаются, поступают на индикатор и отображаются в виде яркой точки. Оператор с помощью масштабной сетки определяет ее азимут и дальность до неё.

Преимущество ИКО состоит в:

- большей информативности, поскольку он обеспечивает двухкоординатную панорамную индикацию;
- одновременное наблюдение за несколькими целями;
- наблюдаемое изображение сравнительно легко воспринимается оператором, его легко идентифицировать с визуально наблюдаемой обстановкой в районе нахождения РЛС.

Целью лабораторной работы «Обнаружение целей и измерение координат радиолокационной станцией в режиме обзора на индикаторе кругового обзора» является:

- изучение принципов построения типовой радиолокационной станции (РЛС) кругового обзора, предназначенной для измерения координат воздушных целей;
- ознакомление с особенностями измерения дальности и азимута в режиме кругового обзора по азимуту;
- исследование характеристик обнаружения РЛС.

Лабораторная работа выполняется на ЭВМ с помощью ПрЭВМ, имитирующей индикатор кругового обзора, включая имитатор цели и помех.

1 Поиск, обнаружение и определение координат цели РЛС кругового обзора

1.1 Поиск и обнаружение целей

В РЛС кругового обзора для обнаружения целей применяется круговой поиск. Обнаружение целей производится визуально операторами по ИКО. При появлении самолета в зоне обнаружения на экране индикатора на соответствующем расстоянии и азимуте появится отраженный сигнал в виде дужки.

Оператор станции обязан знать картину местных предметов (их азимут и дальность), изображаемую на экранах индикаторов, а также характер сигналов, чтобы во время работы не путать их с сигналами от целей.

1.2 Определение координат цели

При считывании координат целей (дальность и азимут) с экрана индикатора точность определения координат зависит от масштаба развертки, которая зависит от положения переключателя масштаба ИКО.

На ИКО отображается горизонтальная дальность, а наклонная (см. рисунок 1). Наклонная дальность – это кратчайшее расстояние между двумя точками, расположенными на разной высоте, определяется оператором по ИКО как расстояние от начала развертки до ближнего края дужки (отметки цели). Расстояние до цели считывается по электрическим масштабным отметкам дальности (по масштабным кольцам).

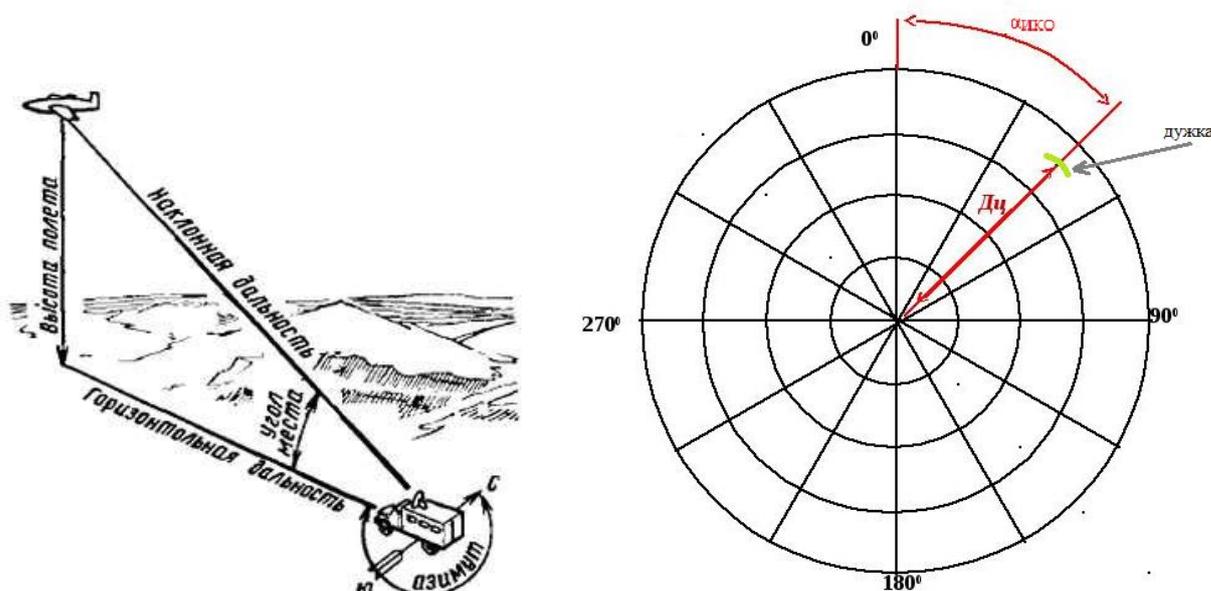


Рисунок 1 – К пояснению наклонной дальности и азимута цели

Азимут цели – это угол между направлением на север и направлением на цель, определяется оператором по индикатору кругового обзора путём визуального отсчёта азимута середины дужки (цели) с помощью электрических азимутальных отметок (см. рисунок 1).

2 Влияние индикаторных устройств на характеристики РЛС

2.1 Влияние системы оператора

Визуальное обнаружение и оценка координат электронно-лучевыми индикаторами дальности и кругового обзора имеют ряд характерных особенностей, которые обусловлены свойствами электронно-лучевых трубок, психофизиологическими возможностями оператора и условиями наблюдения. Оператор совместно с индикатором образуют общую часть системы обработки информации и выполняют функции накопителя энергии сигналов пачки, порогового устройства и устройства отсчета координаты.

Рассмотрим кратко влияние системы оператор-индикатор на основные характеристики РЛС.

Оператор на основании анализа получаемой информации с учетом априорных сведений, полученных в процессе обучения и тренировок, принимает решение о наличии или отсутствии целей. При этом возможен режим визуальной корреляции, характерный при работе оператора ИКО.

Яркая отметка сигнала оставляет на экране близко расположенные следы, которые оператор благодаря особенностям памяти обнаруживает лучше, чем обычную яркостную отметку, формируемую наложением разверток на индикаторе дальности. Указанный способ «накопления» не эквивалентен простому суммированию и называется визуальной корреляцией.

Экспериментальные исследования показывают, что эффект накопления при визуальной корреляции находится по своему значению между когерентной и некогерентной обработкой слабых сигналов (рисунок 2).

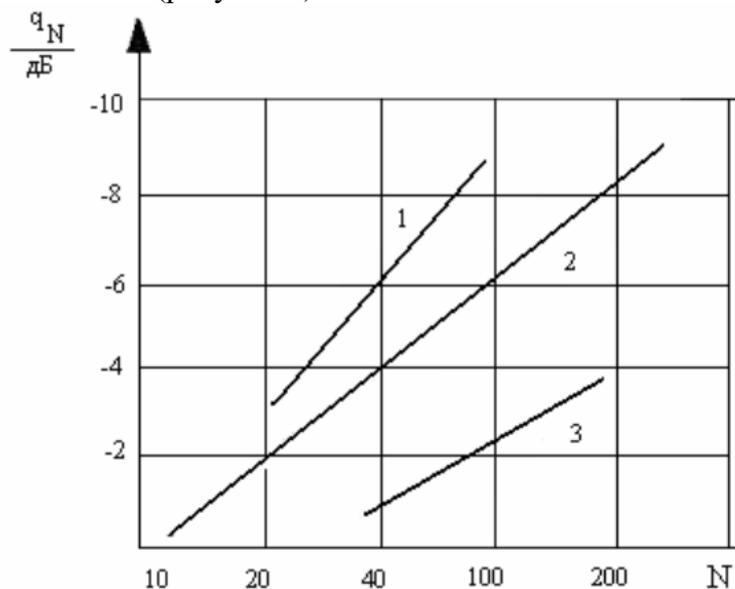


Рисунок 2 – Зависимость порогового отношения сигнал/шум q_N от числа интегрируемых импульсов N для вероятности правильного обнаружения $D = 0,5$: 1 – при когерентной обработке; 2 – при визуальной корреляции; 3 – при некогерентной обработке и идеальном интегрировании

Для яркостных индикаторов типа ИКО контрастность, определяется динамическим диапазоном изменений яркости свечения, составляющим для ИКО довольно малую величину - 10-15 дБ. Практически достаточной считается наблюдаемость, при которой обеспечивается различие сигналов от морской поверхности, земли и цели, т.е. индикатор имеет три градации: «темный» – гладкая морская поверхность; «серый» – земля; «белый» – цель.

2.2 Точность определения координат на индикаторе

Суммарная среднеквадратическая погрешность измерения координаты при условии независимости ошибок от различных факторов вычисляется по формуле:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{вн}}^2 + \sigma_{\text{ш}}^2 + \sigma_{\text{анн}}^2},$$

где $\sigma_{\text{вн}}$, $\sigma_{\text{ш}}$, $\sigma_{\text{анн}}$ - среднеквадратические ошибки, обусловленные тремя факторами, соответственно, внешней средой, влиянием шума приемно-усилительных устройств и аппаратурой станции.

Индикаторное устройство вносит существенный вклад в аппаратурную погрешность. Величина вклада определяется, в основном, масштабом шкалы и применяемым методом отсчета.

В случае измерения дальности, из равенства максимального времени задержки зондирующего сигнала и времени движения луча по экрану следует что:

$$\frac{2D_{\text{шк}}}{c} = \frac{l_{\text{шк}}}{v_p} \Rightarrow D_{\text{шк}} = M_D l_{\text{шк}}, \text{ где } M_D = \frac{c}{2v_p}, \quad (1)$$

где $D_{\text{шк}}$, $l_{\text{шк}}$ – соответственно максимальная дальность, считываемая по шкале и длина шкалы (рабочей части экрана индикатора); M_D – масштаб шкалы по дальности (масштаб развертки); v_p – скорость развертки индикатора.

Оценка дальности до цели (дальность, которую определит оператор) осуществляется следующим образом:

$$D_{\text{ц}}^* = M_D l_{\text{ц}}^*, \quad (2)$$

где $l_{\text{ц}}^*$ - оценка расстояния по шкале индикатора до отметки от цели.

Ошибки в знании величины M_D – ошибки масштаба, как следует из (1), зависят от стабильности скорости распространения радиоволн и скорости развертки v_p . Величина ошибок масштаба обычно мала в сравнении с ошибками отсчета (ошибки оценки $l_{\text{ц}}^*$), которые возникают вследствие интерполяции положения отметки цели между делениями шкалы и параллакса (видимое изменение относительного положения предметов вследствие перемещения глаза наблюдателя). Практически установлено, что ошибки интерполяции и параллакса при оценке положения отметки:

$$\sigma(D_{\text{ц}}^*) = k_{\text{ш}} M_D \Delta l,$$

где Δl – расстояние между делениями шкалы, $k_{\text{ш}}$ – коэффициент учитывающий тип шкалы, для механической шкалы 0,15, для цифровой шкалы (0,1 – 0,05).

Максимальная ошибка оценки пятна соответствует максимальной ошибки в оценке расстояния, которая соответствуют половине размера пятна, и определяется с помощью выражения:

$$\Delta D_{\text{max}}^* = \Delta l_{\text{ц,max}}^* M_D = 0,5 d_n M_D,$$

где d_n – размера пятна на индикаторе.

2.3 Разрешающая способность

Разрешающая способность — это один из основных параметров радиолокатора, характеризующий его способность различать находящиеся друг рядом с другом цели по дальности или азимуту.

Мерой разрешения двух целей по некоторой пространственной координате x является наименьшая разность их координат, при которой обеспечивается раздельное наблюдение целей. При этом полагают, что цели "точечные" и различаются только по координате x . В качестве критерия раздельного наблюдения часто используют критерий, введенный Релеем в оптике: отклики прибора от двух источников различны, если спад интенсивности изображения (яркости или амплитуды на экране индикатора) при переходе от одного максимума к другому равен некоторой заданной величине. Обоснованных

рекомендаций по выбору величины спада при использовании критерия Релея для задач разрешения радиолокационных целей в литературе не приводится. Практически достаточным для разрешения целей считают величину спада не менее 3 дБ.

Потенциальная разрешающая способность в смысле критерия Релея соответствует идеальным условиям приёма, справедливым при большом отношении сигнал/шум и идеальной фокусировке изображения. Реальная разрешающая способность в РЛС с визуальной индикацией целей снижается за счет конечности размеров пятна на индикаторе.

В практических расчетах полагают, что снижение разрешающей способности за счет индикатора равно значению размера пятна по некоторой координате x :

$$\delta(x)_{\text{инд}} = d_n M_x,$$

где M_x - масштаб шкалы индикатора по координате.

Особенность ИКО состоит в том, что при заданном масштабе по дальности, величина масштаба по азимуту не остается постоянной для различных дальностей, поскольку изображение сжимается по углу при приближении к центру экрана.

Определим масштаб ИКО по азимуту. Составим пропорцию:

$$\frac{360^\circ}{2\pi l_y} = \frac{d_n^\circ}{d_n} = M_\alpha,$$

где l_y – расстояние от центра экрана до отметки от цели; d_n° – размер отметки в градусах.

Учитывая формулу (2), запишем выражение, определяющее масштаб азимутальной шкалы ИКО:

$$M_\alpha = \frac{M_D}{D_y} \frac{d_n^\circ}{2\pi}.$$

3 Характеристики обнаружения РЛС

Качественные показатели радиолокационного обнаружения определяются величинами вероятности ложной тревоги F и вероятности правильного обнаружения D .

Вероятность ложной тревоги F равна вероятности превышения шумовым сигналом порогового уровня U_0 . Полагая, что детектор работает в линейном режиме и, принимая распределение вероятностей огибающей шума по форме Релея, получим:

$$F = P\{E > U_0\} = \int_{U_0}^{\infty} \frac{E}{\sigma_u^2} e^{-\frac{E}{\sigma_u^2}} dE = e^{-\frac{U_0^2}{\sigma_u^2}},$$

где E – уровень принятого сигнала, σ_u^2 – мощность (дисперсия) флуктуации напряжения шума.

При наличии полезного сигнала с амплитудой A плотность распределения вероятностей огибающей смеси сигнала и шума определяется обобщенным законом Релея, и для вероятности правильного обнаружения получаем соотношение:

$$D = \int_{U_0}^{\infty} \frac{E}{\sigma_u^2} e^{-\frac{E^2+A^2}{2\sigma_u^2}} I_0\left(\frac{AE}{\sigma_u^2}\right) dE,$$

где A – уровень полезного сигнала, $I_0(x)$ – модифицированная функция Бесселя.

Статистические свойства смеси сигнала с шумом отличаются от статистических свойств только шума. В частности, наличие регулярного сигнала изменяет среднее значение огибающей на выходе детектора, а также мощность её флуктуаций (дисперсию), что и показано на рисунке 2.

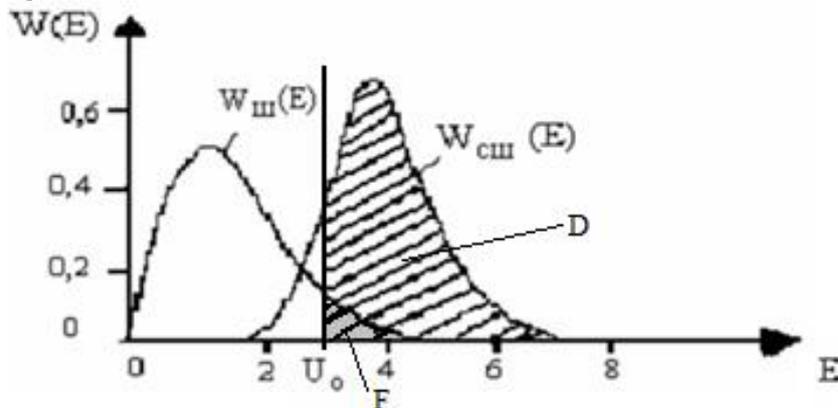


Рисунок 3 – Плотность вероятности шума $W_{ш}(E)$ и смеси сигнал-шум $W_{сш}(E)$ при $A/\sigma_u \approx 3$

На рисунке 3 $W_{ш}(E)$ – плотность вероятности, огибающей шума; $W_{сш}(E)$ – плотность вероятности смеси сигнала и шума. Значения вероятностей F и D , показаны на этом рисунке в виде соответствующих площадей под кривыми. Видно, что увеличение порога U_0 в целях уменьшения F ведёт к уменьшению величины D .

Семейство функций $D(A/\sigma_u, F)$ называют характеристиками обнаружения, пример проиллюстрирован на рисунке 3.

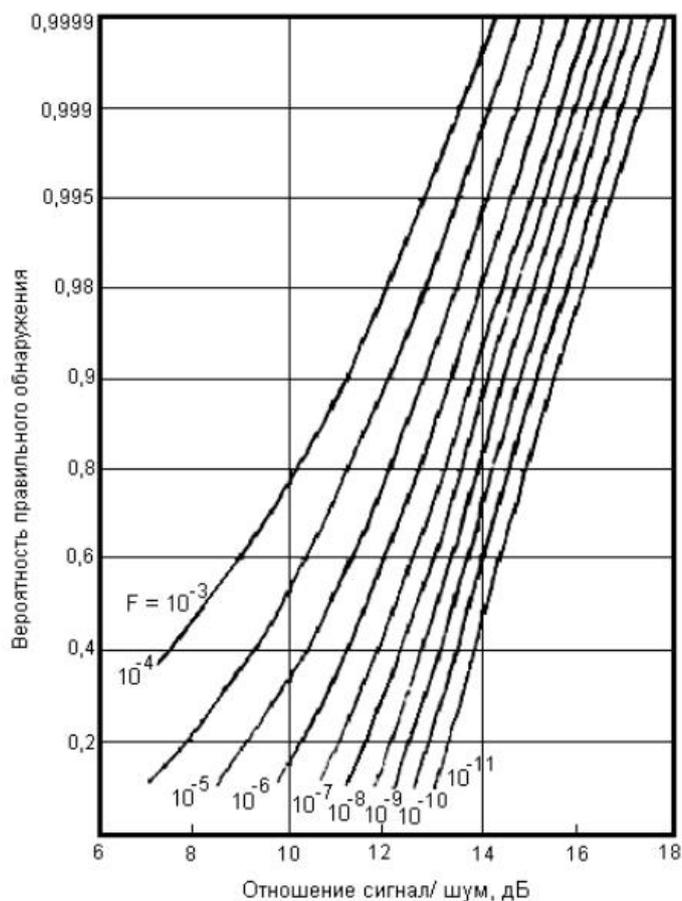


Рисунок 4 – Характеристики обнаружения радиоимпульса со случайной начальной фазой

Вид характеристик обнаружения зависит от статистических свойств сигнала и шума, а также, что более важно, от способа построения приёмного тракта, то есть от тех преобразований (линейных и нелинейных) которые реализованы в приёмнике до порогового устройства.

На рисунке 4 приведены характеристики обнаружения одиночного радиоимпульса со случайной начальной фазой в приёмном тракте с линейным детектором. В случае приёма нескольких радиоимпульсов от цели, а это имеет место при работе РЛС в режиме сканирования ДН, целесообразно использовать все принятые от цели сигналы для улучшения ее обнаружения. Обычно в приёмных трактах РЛС реализуют внутриимпульсную обработку сигналов (то есть обработку одиночного импульса) и последующую междуимпульсную обработку, цель которой накопление (интегрирование) сигналов, принятых за время облучения.

Накопление импульсов — это метод улучшения вероятности обнаружения цели за счет использования энергии нескольких зондирующих импульсов. В зависимости от места расположения накопителя импульсов в тракте приема и обработки различают такие виды накопления: когерентное накопление или некогерентное накопление. Когерентное накопление увеличивает уровень принятого сигнала (отношение сигнал/шум) в N раз, некогерентное в \sqrt{N} раз, где N – количество накопленных импульсов. Увеличение отношения сигнал шум.

Увеличение отношение сигнал/шум плотность вероятности смеси $W_{сш}(E)$ на рисунке 3 смешается по оси абсцисс вправо, что позволяет увеличить вероятность правильного обнаружения при фиксированном пороговом уровне.

4 Описание программного обеспечения

Лабораторная работа «Обнаружение целей и измерение координат радиолокационной станцией в режиме обзора на индикаторе кругового обзора» выполняется на ЭВМ с помощью программы «Lab_IKO» – имитатора индикатора кругового обзора.

Интерфейс программы представлен на рисунке 5.

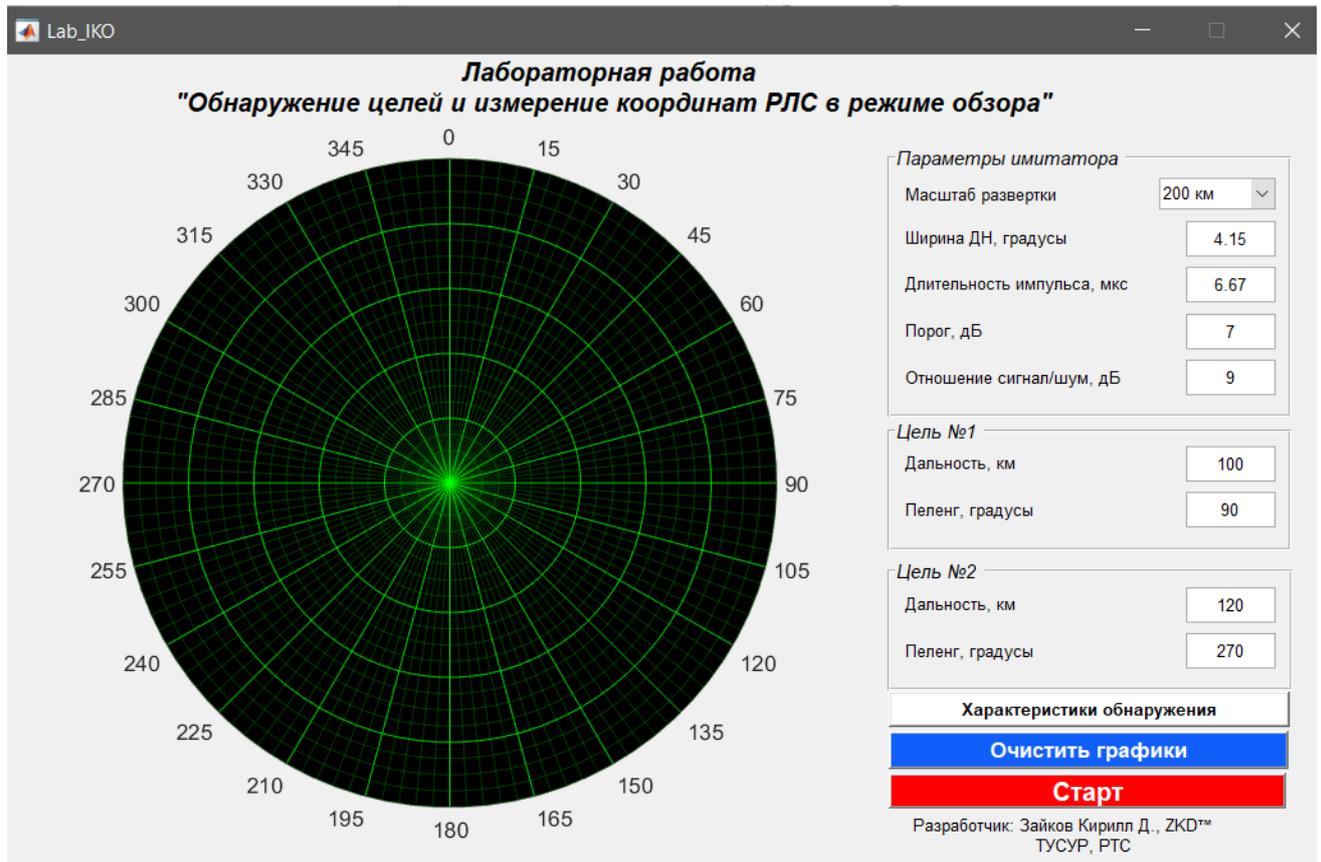


Рисунок 5 – Интерфейс программы «Lab_IKO»

Входные данные разделены на логические группы:

– «Параметры имитатора»:

- Масштаб развёртки (200; 400; 600; 800; 1200 км);
- Ширина диаграммы направленности РЛС в градусах;
- Длительность импульса в микросекундах;
- Порог U_0 в дБ;
- Отношение сигнал/шум в дБ;

– «Цель №1» и «Цель №2»

- Дальность до цели в километрах;
- Пеленг на цель в градусах.

При запуске программы в соответствующих окнах ввода данных внесены величины, представленные на рисунке 4. Студент может изменить эти данные, либо сразу приступить к выполнению лабораторной работы с помощью кнопки «Старт».

После запуска программы с помощью кнопки «Старт» в соответствии с координатами целей на индикаторе кругового обзора появятся дужки, см. рисунок 6. Для того чтобы приостановить работу имитатора необходимо нажать кнопку «Стоп».

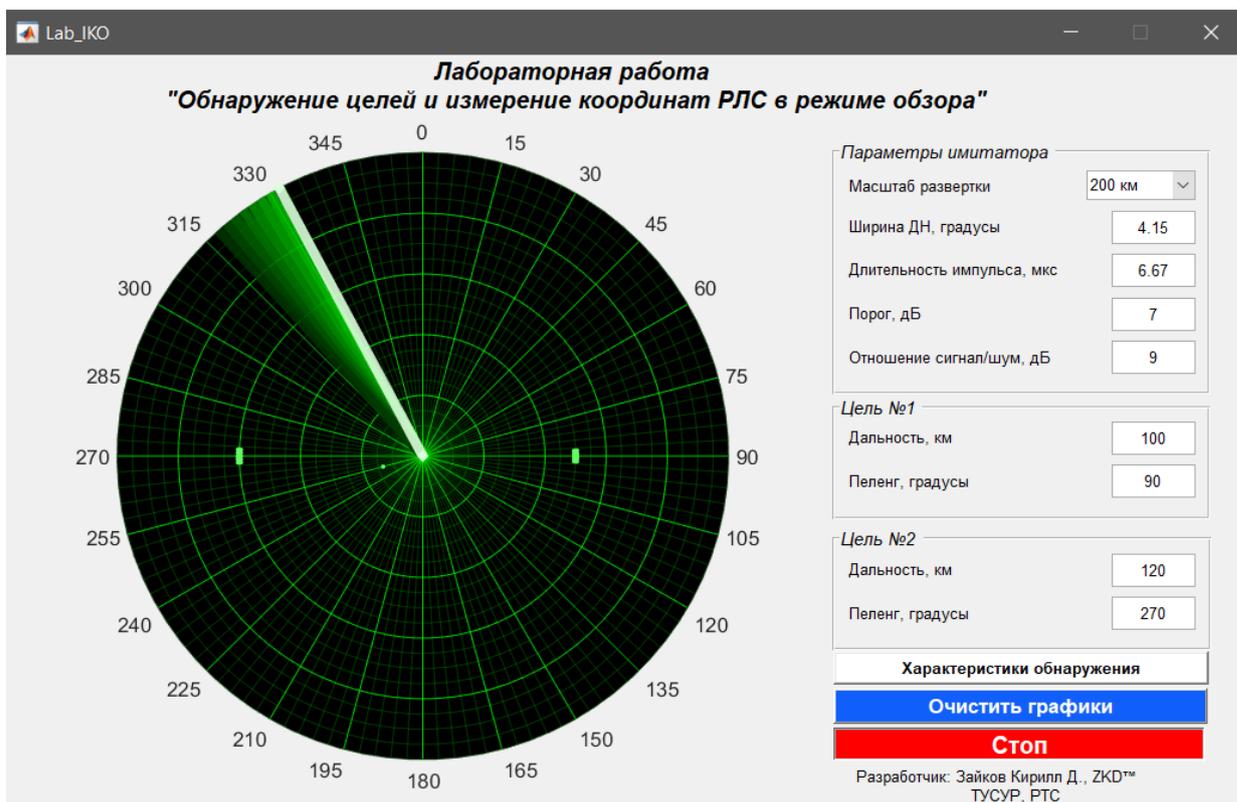


Рисунок 6 – Интерфейс программы «Lab_IKO» после запуска

В процессе работы программы студент может изменять входные данные, которые будут применяться на индикаторе по мере перемещения луча развертки (белый луч на рисунке 6).

Для выполнения п. 8 задания на лабораторную работу студент с помощью кнопки «Характеристики обнаружения» сохраняет текстовый файл с сигналом в одном элементе разрешения без пороговой фильтрации. Для построения характеристик обнаружения студент должен воспользоваться табличным редактором, выполнить пороговую фильтрацию и рассчитать вероятность ложной тревоги.

5 Задание на лабораторную работу

Для допуска к лабораторной работе студентам необходимо ответить на вопросы: «Как экспериментально определить разрешающую способность по дальности и по азимуту?» и «Каким образом будут выполняться п. 2 и п. 4 работы?».

1. Запустить программу лабораторной работы, узнать у преподавателя величину ширины диаграммы направленности и длительности импульса.

2. Экспериментально определить разрешающую способность по дальности ИКО при различных масштабах разверток.

3. Используя теоретические соотношения подраздела 2.3, рассчитать разрешающую способность индикаторов по дальности при различных масштабах разверток.

По результатам выполнения пп. 2 и 3 заполнить таблицу 1 и построить графики зависимости $\delta(D_{\text{ИКО}}) = f(M_D)$.

4. Экспериментально определить разрешающую способность ИКО по азимуту при различных масштабах развертки по дальности.

5. Используя соотношения подраздела 2.3, рассчитать разрешающую способность ИКО по азимуту при различных масштабах развертки.

По результатам выполнения пп. 4 и 5 заполнить таблицу 1 и построить графики зависимости $\delta(\alpha_{\text{ИКО}}) = f(M_D)$.

Таблица 1 – Результат исследования разрешающей способности от масштаба развертки

Масштаб (M_D), км		200	400	600	800	1200
$\delta(D_{\text{ИКО}})$, км	Расчёт					
	Измерение					
$\delta(\alpha_{\text{ИКО}})$, градусы	Расчёт					
	Измерение					

6. Экспериментально снять зависимость разрешающей способности ИКО по азимуту от дальности до цели при масштабе развертки $M_D = 600$ км.

7. Пользуясь соотношениями подраздела 2.3 рассчитать разрешающую способность ИКО по азимуту от дальности до цели при масштабе развертки $M_D = 600$ км.

По результатам выполнения п.п. 6 и 7 заполнить таблицу 2 и построить графики зависимости $\delta(\alpha) = f(D_{\text{Ц}})$.

Таблица 2 – Результат исследования разрешающей способности по азимуту от дальности до цели

Дальность ($D_{\text{Ц}}$), км		50	100	200	400	500
$\delta(\alpha)$, км	Расчёт					
	Измерение					

8. Рассчитать по сохранённым данным характеристики обнаружения РЛС в виде зависимости вероятности ложной тревоги от значения порога $F = f(U_0)$. Вероятность ложной тревоги считать приближено как количество импульсов выше порогового уровня к общему количеству импульсов. По результатам расчёта построить характеристики обнаружения.

9. Сделать выводы.

6 Контрольные вопросы

1. Объясните физические принципы измерения дальности и азимута, используемые в РЛС.
2. Объясните методику экспериментальной оценки вероятности правильного обнаружения.
3. Перечислите способы уменьшения аппаратурной погрешности измерения дальности, реализованные в РЛС.
4. Какие по Вашему мнению можно предложить дополнительные меры с целью увеличения разрешающей способности по дальности и азимуту?
5. Как влияет ширина диаграммы направленности и длительность импульса на разрешающую способность РЛС?
6. Объясните особенности работы оператора в режиме обнаружения цели на индикаторе дальности и ИКО.
7. Объясните положительные и отрицательные последствия увеличения скорости сканирования диаграммы направленности.
8. Объясните особенности работы РЛС при обнаружении и измерении координат низколетящих целей.
9. Что такое максимальная дальность однозначного отсчёта в импульсной РЛС?
10. В каких случаях возникает ложная тревога? Поясните вывод формулы
11. Что такое период ложной тревоги и как его можно экспериментально определить при помощи осциллографа или частотомера?
12. Как влияет изменение порога на величину вероятности ложной тревоги и правильного обнаружения?
13. Что такое характеристики обнаружения? Чем определяется их вид?
14. Можно ли считать, что дальность действия РЛС есть величина случайная? Почему?

7 Список рекомендуемой литературы

1. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Изд. «Радиотехника». М., 2004. – 320 с.
2. Радиотехнические системы /Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Советское радио, 1990.
3. Денисов В.П., Дудко Б.П. Радиотехнические системы. Изд-во ТУСУР, Томск, 2006 г.