МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт радиоэлектроники и информационной безопасности

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИИ С АКТИВНЫМ ОТВЕТОМ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ по дисциплинам
«Основы теории радиолокационных систем и комплексов»,
«Теория и техника радиолокации и радионавигации»,
«Радиоэлектронные системы извлечения информации»
для студентов очной и заочной форм обучения
специальности 11.05.01 — «Радиоэлектронные системы и комплексы»,
направления 11.04.01 — «Радиотехника» и
11.04.02 — «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Севастополь
СевГУ
2018

УДК 621.396.96

Р е ц е н з е н т:
С.Р. Зиборов - доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», канд. техн. наук, доцент
Ответственный за выпуск:
И.Л. Афонин - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Составители: А.Г. Лукьянчук, А.В. Мельников, А.Л. Поляков

Исследование характеристик системы радиолокации с активным ответом: учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Основы теории радионавигационных систем и комплексов», «Теория и техника радиолокации и радионавигации» для студентов очной и заочной форм обучения направления подготовки 11.03.01 — Радиотехника и специальности 11.05.01 — Радиоэлектронные системы и комплексы / Сост. А.Г. Лукьянчук, А.В. Мельников, А.Л. Поляков. — Севастополь: СевТУ, 2018. — 22 с.

Предназначено помочь студентам в изучении принципов построения систем радиолокации с пассивным и активным ответом. В методических указаниях приведены основные формулы и примеры расчета дальности действия различных систем радиолокации. Изложены принципы построения пассивных и активных радиомаяков, приводится функциональная схема, временные диаграммы, назначение органов управления радиолокационным ответчиком (РЛО). Представлена методика экспериментального исследования характеристик РЛО.

УДК 621.396.96

Учебно-методическое пособие рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 7 от 31 января 2018 года.

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании ученого совета Института радиоэлектроники и информационной безопасности, протокол № 3 от 21 февраля 2018 года.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2018

ВВЕДЕНИЕ

Целью лабораторной работы является закрепление теоретических сведений о работе систем радиолокации с пассивным и активным ответом, умений оценивать их энергетические характеристики, изучение устройства и принципа действия радиолокационного ответчика (РЛО) морской системы связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ), исследование его характеристик, приобретение практических навыков по техническому обслуживанию и эксплуатации РЛО.

1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ РАДИОЛОКАЦИИ

Максимальная дальность $D_{МАКС}$ обнаружения пассивных объектов радиолокационной станцией (РЛС) в пределах прямой видимости (без учета поглощения в атмосфере, осадках, отражений от подстилающей поверхности и т.д.) определяется уравнением дальности радиолокации для свободного пространства:

$$D_{МАКС} = \sqrt[4]{\frac{P_{И.РЛС}\, G_{РЛС}^{2}\, \sigma_{ЭФФ}\, \lambda^{2}}{64\,\pi^{3}\, P_{ПР.МИН.\ РЛС}}}\quad , \qquad (1)$$

где $P_{И.РЛС}$ – импульсная мощность передатчика РЛС;

$G_{РЛС}$ – коэффициент усиления приемопередающей антенны РЛС;

$\sigma_{ЭФФ}$ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта;

λ – рабочая длина волны РЛС;

$P_{ПР.МИН.\ РЛС}$ – минимальная мощность сигнала на входе приемника РЛС, достаточная для обнаружения объекта.

Поскольку реальные объекты имеют различную ЭПР, то и дальность их обнаружения может значительно отличаться. В таблице 1 приведены средние значения ЭПР различных объектов.

Таблица 1 — Средние значения ЭПР различных объектов

Объект	Средняя ЭПР ($м^2$)
Транспортное судно большого тоннажа, более 10 тыс. тонн	$(10—15)\cdot10^3$
Транспортное судно среднего тоннажа 1—10 тыс. тонн	$(3—10)\cdot10^3$
Транспортное судно малого тоннажа 50—200 тонн	50—250
Спасательный мотобот	7—20
Шлюпка, спасательный плот	1—3
Человек	0,5—1,2

Обнаружение малоразмерных объектов, таких как шлюпка или спасательный плот затруднено в связи с малой эффективной площадью рассеяния.

Подстановка среднего значения ЭПР в формулу (1) показывает, что при использовании РЛС “Наяда 5” (см. Приложения Б,В) расстояние, на котором может быть обнаружен спасательный плот или шлюпка, составляет $D_{МАКС} \approx 10…13$ км в условиях свободного пространства.

Для увеличения дальности обнаружения радиолокационных объектов широко используются пассивные уголковые радиолокационные отражатели (рис.1), которые имеют достаточно большую эффективную отражающую площадь при относительно малых габаритных размерах. Они используются в качестве пассивных радиомаяков и устанавливаются вдоль взлетно-посадочных полос аэродромов, на малоразмерных судах и яхтах, на спасательных плавсредствах для увеличения ЭПР объектов и улучшения их радиолокационной видимости.

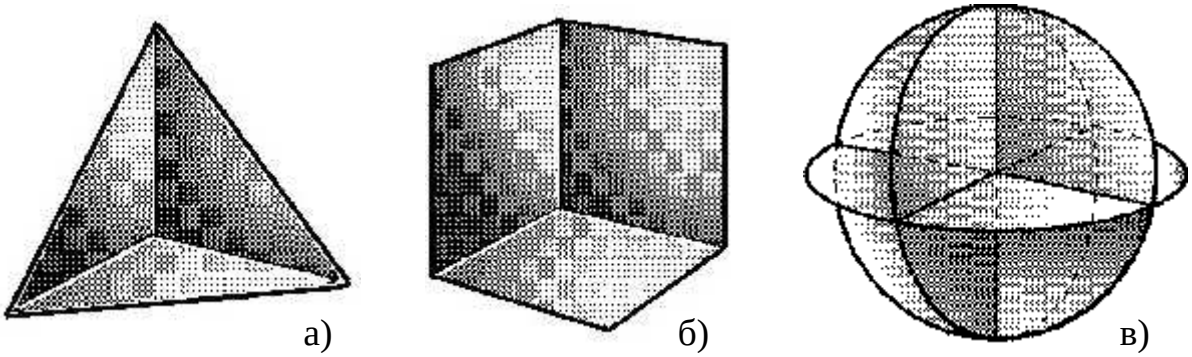


Рис. 1. Уголковые отражатели с треугольными гранями (а), квадратными гранями (б) и аварийный уголковый отражатель

В уголковых отражателях используется известный в оптике эффект зеркального отражения лучей от трех взаимно перпендикулярных пересекающихся плоскостей, образующих пространственный угол 90°. За счет этого явления уголковый отражатель обладает свойством возвращать падающую энергию обратно, почти не рассеивая ее.

ЭПР уголкового отражателя с треугольными гранями (рис. 1, а) $\sigma_{Т\ ЭФФ}$ почти на порядок меньше, чем ЭПР отражателя с квадратными гранями (Рис. 1,б) $\sigma_{К\ ЭФФ}$, при условии, что размеры рёбер отражателей одинаковы.

$$\sigma_{Т\,ЭФФ} = \frac{4\,\pi\,a^4}{3\,\lambda^2}, \qquad \sigma_{К\,ЭФФ} = \frac{12\,\pi\,a^4}{\lambda^2}\ , \tag{2}$$

где a – длина ребра отражателя;

Однако ширина диаграммы обратного рассеяния по уровню половинной мощности отражателя с треугольными гранями составляет около 60°, а отражателя с квадратными гранями всего 35°. Кроме того, расчетные характеристики уголковых отражателей реализуются только при соблюдении точной перпенди-

кулярности граней, что может быть легче обеспечено в отражателе с треугольными гранями, имеющем более жесткую конструкцию. Эти факторы определили преимущественное применение треугольных граней.

На рисунке 1, в изображен уголковый отражатель, который входит в состав аварийного оборудования спасательных плавсредств. Использование такой комбинации из восьми совмещенных уголковых отражателей позволяет сформировать практически сферическую диаграмму обратного рассеяния.

Расчеты по формулам (2) показывают, что уголковый отражатель с треугольными гранями и длиной ребра a = 30 см имеет эффективную отражающую площадь на λ = 3,2 см равную $\sigma_{\text{Т ЭФФ}}$ = 34 кв.м, а дальность его обнаружения РЛС “Наяда 5” составляет $D_{\text{МАКС}}$ = 23,3 км (см. Приложения Б,В).

Дальнейшего увеличения дальности обнаружения объектов можно добиться при использовании активных радиолокационных ответчиков (РЛО), которые при приеме импульсных сигналов РЛС формируют ответный радиосигнал в том же частотном диапазоне, в котором работает РЛС.

Поэтому дальность обнаружения объектов в таких радиосистемах с активным ответом определяется как параметрами канала запроса (от РЛС к РЛО), так и параметрами канала ответа (РЛО — РЛС).

Максимальная дальность действия канала запроса $D_{\text{ЗАПР}}$ системы РЛС – РЛО, на которой запросные сигналы от РЛС еще имеют достаточную мощность для запуска аппаратуры ответчика, может быть найдена из уравнения дальности радиосвязи для свободного пространства:

$$D_{\text{ЗАПР}} = \sqrt{\frac{P_{\text{И. РЛС}}\ G_{\text{РЛС}}\ G_{\text{РЛО}}\ \lambda^2}{16\ \pi^2\ P_{\text{ПР.МИН.РЛО}}}}\ , \qquad (4)$$

где $G_{\text{РЛО}}$ – коэффициент усиления антенны ответчика;

$P_{\text{ПР. МИН. РЛО}}$ – минимальная мощность сигнала РЛС на входе приемника РЛО, достаточная для нормальной работы приемной аппаратуры РЛО.

Максимальная дальность действия канала ответа $D_{\text{ОТВ}}$ системы РЛО — РЛС, на которой ответные сигналы РЛО еще имеют мощность, достаточную наблюдения их на экране РЛС, может быть найдена из аналогичного соотношения:

$$D_{\text{ОТВ}} = \sqrt{\frac{P_{\text{И. РЛО}}\ G_{\text{РЛО}}\ G_{\text{РЛС}}\ \lambda^2}{16\ \pi^2\ P_{\text{ПР.МИН.РЛС}}}}\ , \qquad (5)$$

где $P_{\text{И. РЛО}}$ – мощность излучения передатчика РЛО.

Как правило, максимальная дальность действия канала запроса значительно превосходит дальность канала ответа. Это обусловлено тем, что им-

пульсная мощность сигнала РЛС во много раз превосходит мощность излучения передатчика РЛО.

Анализ по формулам (4 и 5) системы радиолокации с активным ответом, включающей импульсную корабельную РЛС “Наяда 5” и РЛО "Муссон 502" показывает, что максимальная дальность уверенного приема РЛО запросных сигналов составляет $D_{\text{ЗАПР}}$ = 193 км, а максимальная дальность обнаружения ответных сигналов, излучаемых РЛО “Муссон 502” с помощью РЛС “Наяда 5” не превышает 112 км. (см. Приложения Б,В).

Дальность действия системы с активным ответом в целом оценивается по минимальному из полученных значений дальности для каналов запроса и ответа.

Сравнительные результаты расчетов дальности обнаружения различных объектов в свободном пространстве с помощью импульсной РЛС сведены в таблицу 2.

Таблица 2 — Дальность обнаружения объектов РЛС "Наяда-5"

<table>
<tr><td>Вид объекта</td><td>шлюпка</td><td>уголковый отражатель</td><td colspan="2">РЛО “Муссон 502” с активным ответом</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Дальность обнаружения</td><td rowspan="2">~10 км</td><td rowspan="2">~23 км</td><td>канал запроса 193 км</td><td>канал ответа 111 км</td></tr>
<tr><td colspan="2">система в целом ~110 км</td></tr>
</table>

Следует учесть, что представленные результаты получены для свободного пространства и в условиях прямой видимости. Эти расчеты не учитывали молекулярное поглощение энергии радиоволн в тропосфере, потери в дожде и тумане, влияние отражений от подстилающей земной или морской поверхности, которые могут на порядок снижать уровень сигнала при распространении радиоволн в реальной тропосфере.

Кроме того условие прямой видимости между РЛС и объектом с учетом эффекта затенения за счет сферичности Земли ограничивает предельную дальность действия системы $D_{\text{ПРЕД}}$, которая зависит от высоты установки антенны РЛС $h_{\text{А}}$ и высоты расположения цели $h_{\text{Ц}}$:

$$D_{\text{ПРЕД}}(\text{км}) \approx 4{,}1\left[\sqrt{h_{\text{А}}(\text{м})} + \sqrt{h_{\text{Ц}}(\text{м})}\right]. \qquad (6)$$

При высоте установки антенны судовой РЛС 16 м и высоте объекта над морской поверхностью 1 м прямая видимость обеспечивается на дальности до 20 км, а при использовании РЛС установленной на самолете с высотой полета 0,5 км прямая видимость обеспечивается на дальности до 90 км.

2. НАЗНАЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОТВЕТЧИКА

РЛО используется при проведении поисковых операций на море и предназначен в системе ГМССБ для обнаружения и определения местоположения судов, терпящих бедствие на море, с помощью судовых и самолетных навигационных РЛС. При аварийной обстановке на судне РЛО устанавливается на судовые спасательные плавсредства на штатное место или закрепляется на максимально возможной высоте (не менее 1 м над уровнем моря).

Спасательный РЛО представляет собой импульсное ретранслирующее устройство. Он принимает сигналы, излучаемые корабельной РЛС, и излучает ответные сигналы, которые принимаются приемником РЛС и используются для определения пеленга и расстояния.

Для опознания ответного сигнала РЛО применяется его кодирование, которое состоит в том, что на каждый принятый одиночный импульс РЛС радиолокационный ответчик излучает последовательность импульсов, которые индицируются на экране радиолокатора в виде радиальной последовательности равномерно размещенных яркостных отметок (рис. 4).

Судовые и самолетные навигационные РЛС работают в широком частотном диапазоне 9,2…9,5 ГГц. Для того чтобы обеспечить возможность взаимной работы РЛО с различными РЛС, приемник РЛО должен иметь широкую полосу пропускания (300 МГц), а передатчик РЛО излучать широкополосные сигналы, частоты которых будут находиться в полосе пропускания приемников различных радиолокационных станций. Для достижения этой цели в РЛО применяют генераторы сигналов с перестройкой по частоте.

Технические и эксплуатационные характеристики РЛО должны соответствовать требованиям, изложенным в Резолюции Международной морской организации (IMO) A.802(19) “Эксплуатационные требования к радиолокационным ответчикам спасательных шлюпок и плотов для использования в поисково-спасательных операциях”:

– дальность обнаружения РЛО должна составлять не менее 5 морских миль (9,26 км) при высоте установки антенны навигационного радиолокатора 15 метров и антенны РЛО 1 метр над водной поверхностью;

– продолжительность работы РЛО без замены элементов питания в ждущем режиме – не менее 96 часов и 8 часов – в режиме излучения ответного сигнала;

– световая непрерывная сигнализация должна включаться при подаче питания и световая прерывистая сигнализация – при облучении РЛО зондирующими импульсами РЛС.

– РЛО должен сохраняет работоспособность в диапазоне температур от минус 20°С до плюс 55°С, а также в условиях воздействия морской воды, нефти, солнечного света, соляного (морского) тумана, инея, росы, обледенения, качки, длительных наклонов и др.

– РЛО должен обладать положительной плавучестью и быть оборудован плавучим фалинем, пригодным для использования как буксир.

2.1. Технические характеристики и принципы работы радиолокационного ответчика "Муссон 502"

Технические характеристики радиолокационного ответчика "Муссон 502" полностью соответствуют требованиям Резолюции IMO A.802(19):

Диапазон частот излучаемого сигнала ..... 9200...9500 МГц;

Вид модуляции излучаемого сигнала..... ЛЧМ;

Длительность прямого хода ЛЧМ..... 7,5 ± 1 мкс;

Длительность обратного хода ЛЧМ ..... 0,4 ± 0,1 мкс;

Количество перестроек частоты излучаемого сигнала 12

Время задержки излучаемого сигнала

относительно запросного импульса не более ..... 0,5 мкс

Поляризация излучения ..... горизонтальная

Излучаемая мощность ..... 400 мВт

Минимальная пороговая мощность сигнала на входе приемника РЛО:

– при длительности импульса запроса 0,5 мкс..... минус 80 дБ/Вт

– при длительности импульса запроса 0,08мкс..... минус 67дБ/Вт

Время восстановления чувствительности приемника ..... не более 10 мкс

Коэффициент усиления антенны ..... не менее 6

Ширина диаграммы направленности по угу места..... 25 градусов

Ширина диаграммы направленности по азимуту

при неравномерности не более $\pm$ 2 дБ..... 360 градусов

Масса РЛО без элементов питания, не более ..... 1,0 кг

Структурная схема РЛО “Муссон 502” изображена на рис. 2, а временные диаграммы, поясняющие его работу – на рис. 3.

В состав РЛО входят следующие основные блоки: приемо-передающая волноводно-щелевая антенна, СВЧ модуль, плата управления, плата питающих напряжений, плата индикации, блок элементов питания. Электронная часть РЛО помещена в герметичный корпус, имеющий положительную плавучесть. Его конструкция допускает сбрасывание в воду с высоты 20 м.

Включение ответчика производится поворотом ручки “ВКЛ / ON”. При этом происходит замыкание магнитоуправляемого контакта S1 и напряжение от элементов питания поступает на плату питающих напряжений. Одновременно включается светодиод, сигнализирующий о готовности к работе. После подачи питающих напряжений ответчик включается в режим ожидания.

Переход из режима ожидания в режим передачи происходит автоматически при облучении РЛО запросными импульсами навигационного радиолокатора трехсантиметрового диапазона волн.

Запросный сигнал, излученный навигационной РЛС $P_{\text{изл. РЛС}}$, через некоторое время $t_з = D/c$, определяемое дальностью до объекта D, поступает на вход приемного устройства РЛО $P_{\text{вх.пр.РЛО}}$. Сигнал принимается антенной РЛО и через циркулятор поступает на вход СВЧ усилителя приемного устройства РЛО. После усиления и детектирования этот сигнал приобретает уровень $U_{\text{вых.пр.РЛО}}$, достаточный для обработки его формирователем и цифровыми логическими элементами платы управления.

С выхода формирователя этот сигнал поступает на модулятор передающего устройства, который подает напряжение питания на генератор управляемый напряжением (ГУН), на СВЧ усилитель передатчика РЛО и переключает светодиод в режим прерывистого свечения.

Кроме того выходной импульс формирователя запускает генератор пилообразного напряжения (ГПН). Вследствие этого, одновременно с включением напряжения питания передатчика РЛО на вход управления частотой ГУН поступает пилообразное напряжение от ГПН $U_{\text{упр ЧМ РЛО}}$. Это приводит к тому, что непрерывный сигнал, генерируемый ГУН, изменяет свою частоту (свипирует) в диапазоне от 9200 МГц до 9500 МГц по пилообразному закону. Время нарастания частоты составляет 7,5 мкс, а обратное время свипирования – 0,4 мкс. После усиления этот частотно-модулированный сигнал мощностью 400 мВт через циркулятор и антенну излучается в пространство.

Счетное устройство отсчитывает 12 полных периодов управляющего напряжения ГПН и после этого формирует импульс сброса, который выключает модулятор, отключает напряжение питания передатчика РЛО и возвращает формирователь в исходное состояние.

После этого РЛО готов к приему следующего запросного сигнала.

Излученный РЛО частотно-модулированный сигнал с временным запаздыванием $t_з = D/c$ поступает на вход приемника РЛС. Полоса пропускания УПЧ приемника $\Delta f_{\text{пр.РЛС}}$ достаточно узкая и составляет от 1 МГц до 10 МГц. В моменты, когда частота ответного ЛЧМ сигнала РЛО попадает в эту полосу пропускания, на выходе приемника формируется отклик в виде 12 последовательных коротких импульсов $U_{\text{вых.пр.РЛС}}$. Запаздывание первого импульса в этой последовательности относительно зондирующего импульса РЛС пропорционально расстоянию между РЛС и РЛО.

На экране индикатора кругового обзора при этом отображается цепочка из 12 яркостных отметок (Рис. 4а). Ближняя яркостная отметка в этой цепочке соответствует координатам РЛО. Незначительным смещением по дальности, обусловленным запаздыванием в цепях РЛО и РЛС, можно пренебречь.

При уменьшении дальности уровень сигнала РЛО возрастает, что приводит к появлению дополнительных откликов (рисунок 4б). Причиной этого является прием ответного сигнала РЛО на боковые лепестки ДН РЛС и отражения от посторонних объектов (надстроек, мачт и т.п)

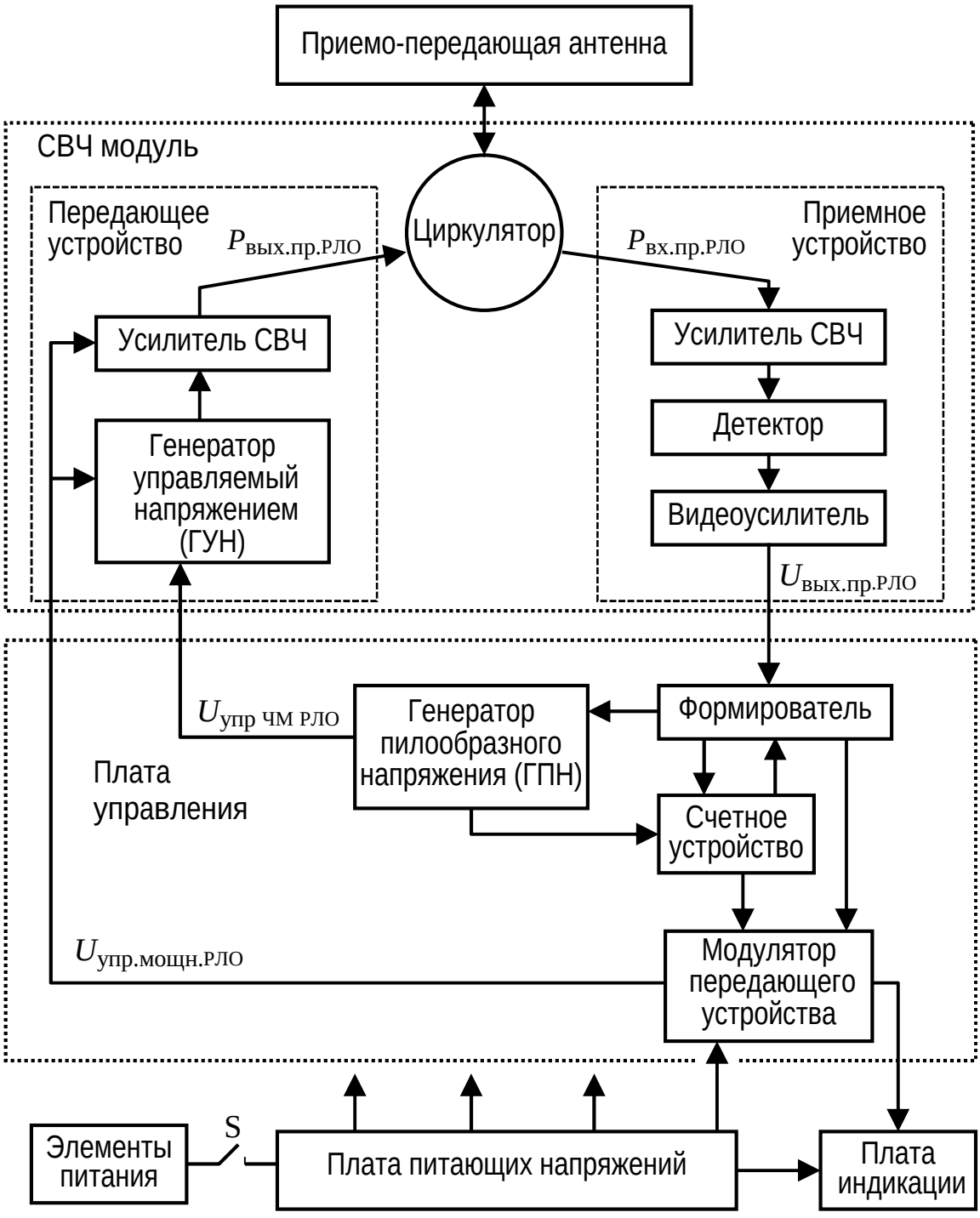


Рис. 2. Структурная схема РЛО “Муссон 502”

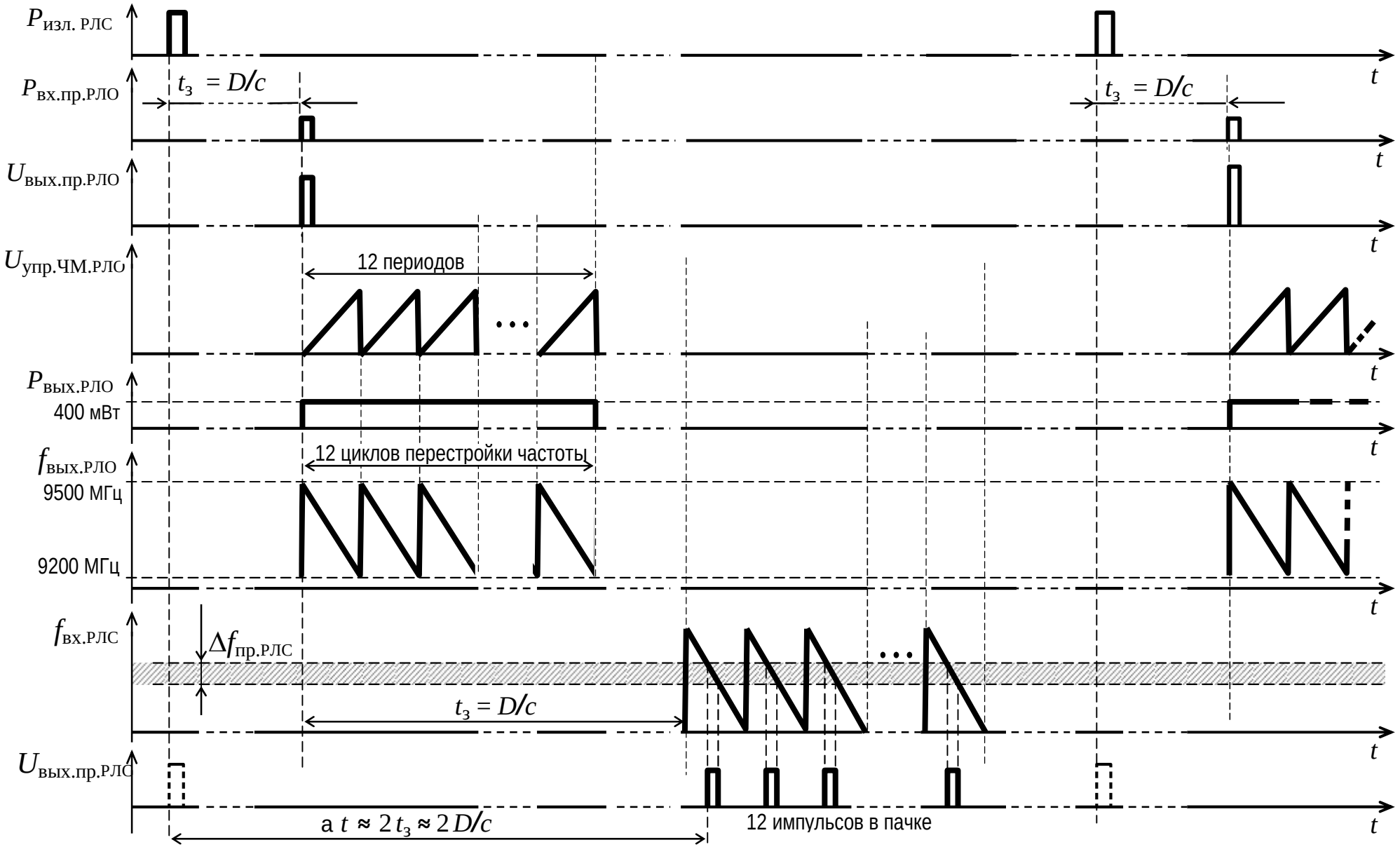


Рис. 3. Временные диаграммы, поясняющие работу радиолокационного ответчика

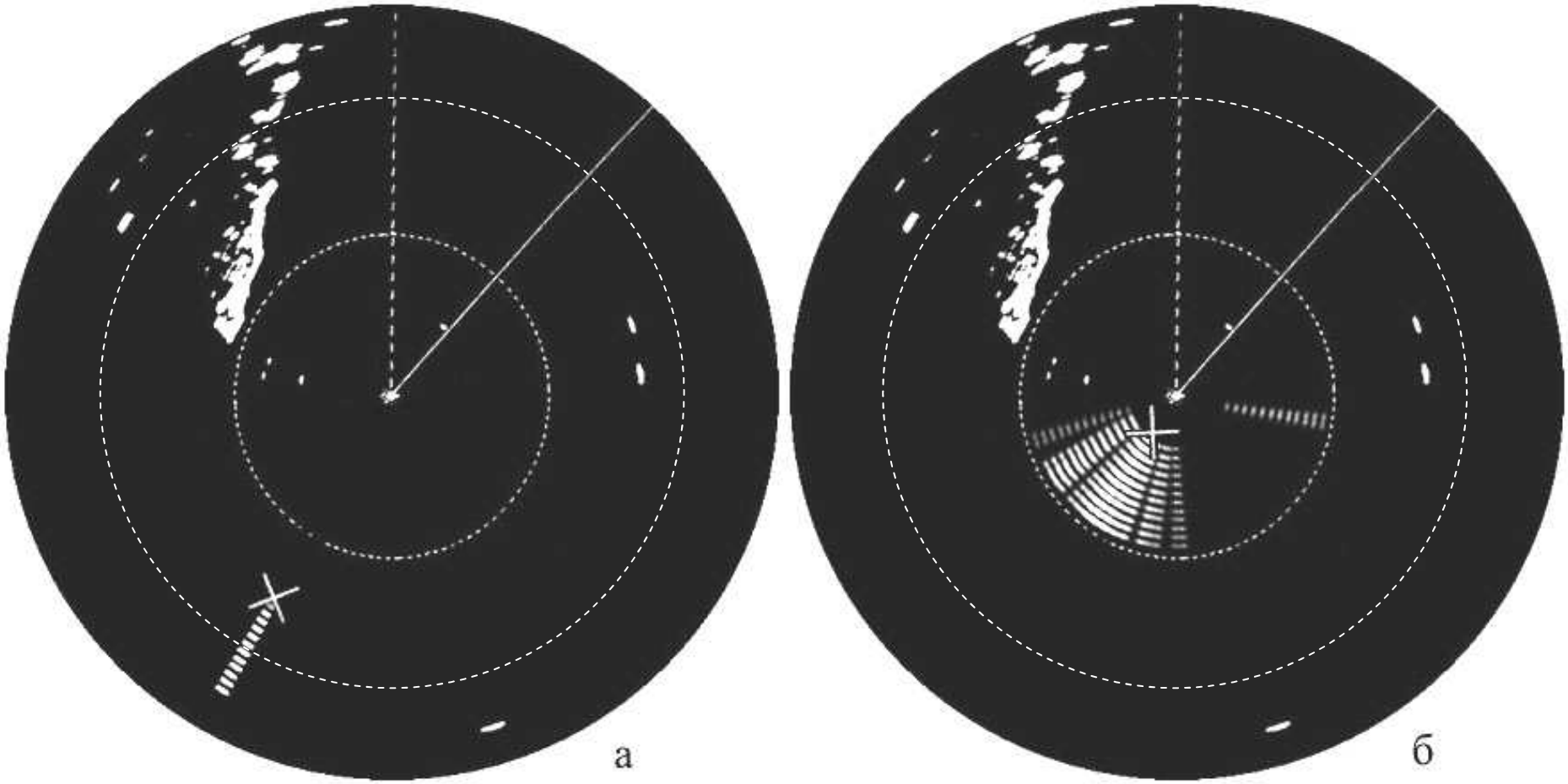


Рис. 4. Изображение сигналов радиолокационного ответчика
на экране судовой радиолокационной станции кругового обзора:
а — при большой дальности от РЛС до ответчика; б — при малой дальности до ответчика.
Значком ✕ обозначено местоположение ответчика

2.2. Особенности конструкции и обслуживание РЛО “Муссон 502”

Конструктивно РЛО (рис. 5, а) состоит из радиопрозрачного колпака, в который устанавливается радиоэлектронный модуль. Колпак закрепляется через уплотнительные прокладки с помощью накидной гайки.

Радиоэлектронный модуль (см. рис. 5, б) включает следующие узлы:

– СВЧ модуль, на фланце которого закреплена волноводно-щелевая антенна выполненная на прямоугольном волноводе сечением 23×3 мм со щелями в широкой стенке волновода;

– плата управления;

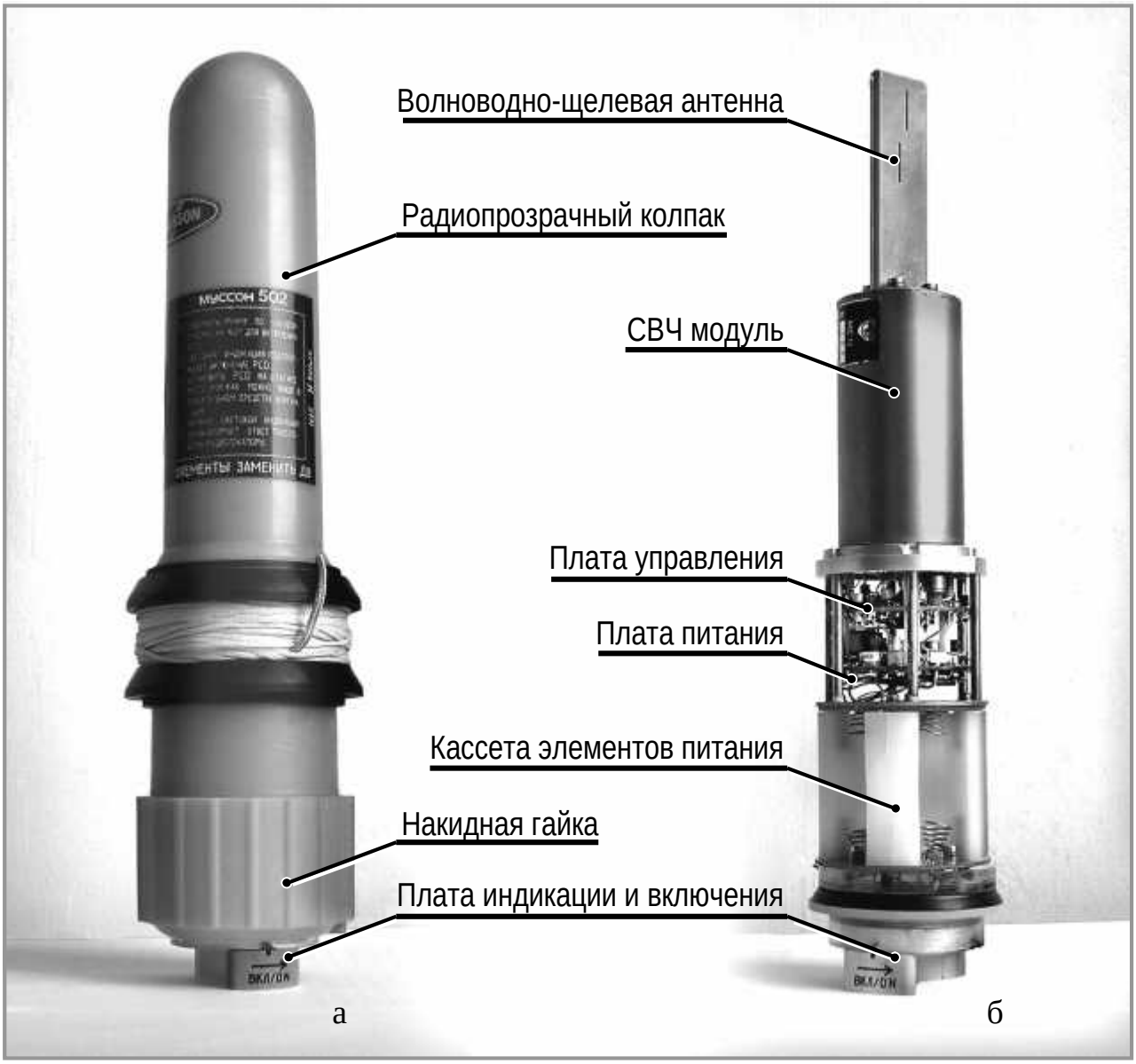


Рис. 5. Внешний вид радиолокационного ответчика "Муссон 502" (а)
и конструкция его радиоэлектронного модуля (б)

– плата стабилизаторов напряжений питания (+6,8 В и –3 В), которые представляют собой преобразователи постоянного напряжения элементов питания в переменное с последующим выпрямлением и стабилизацией;

– кассета из полиэтилена с четырьмя элементами питания;

– плата индикации и включения РЛО на которой установлены сигнальный светодиод, магнитоуправляемый контакт (геркон) и предохранитель.

На судне РЛО “Муссон 502” устанавливаются на специализированный кронштейн во внутренних помещениях судна по левому и правому борту в непосредственной близости к выходу на ходовой мостик или верхнюю палубу. В аварийных ситуациях РЛО снимается с переборки судна и закреплятся на спасательном плавсредстве на штатное место.

Техническое обслуживание РЛО включает:

– ежемесячную проверку на отсутствие механических повреждений, наличие пломбы и наличие записи о дате очередной замены элементов питания;

– ежегодную проверку совместной работы РЛО с радиолокатором судна;

– замену элементов питания не менее чем за 12 месяцев до окончания срока их хранения.

2.3. Методика проверки работоспособности РЛО радиолокатором судна

6.1. При проверке работы РЛО установить вертикально над головой.

6.2. Включить РЛО, повернув ручку, имеющую надпись “ВКЛ/ON”, по часовой стрелке на 90°. Проконтролировать постоянное свечение светодиодного индикатора. РЛО готов к работе.

Выключение РЛО производится поворотом ручку против часовой стрелки. При этом световой индикатор должен погаснуть.

6.3. Обеспечить между проверяемым РЛО и работающей навигационной РЛС судна расстояние более 5 миль.

6.4. Включить РЛО. При облучении РЛО зондирующими импульсами радиолокационной станции трехсантиметрового диапазона волн, световая индикация РЛО из постоянного свечения переходит в прерывистое. При этом на экране навигационного радиолокатора высвечиваются ответные сигналы РЛО в виде последовательности равномерно расположенных яркостных точек или дуг.

Расстояние между первым и двенадцатым ответным сигналом РЛО на экране радиолокатора не должно превышать 9 миль. Типичный вид отметки от радиолокационного ответчика на экране судовой РЛС приведен на рисунке 4.

Расстояние до объекта, на котором находится РЛО, на экране радиолокатора определяется по первому (ближнему) ответному сигналу.

6.5. В целях экономии емкости элементов питания РЛО и недопустимости создания помех другим радиолокаторам и радиосистемам данная проверка должна производиться в течение нескольких секунд.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

3.1 Теоретическая оценка эффективности применения РЛО

а) Из приведенных в разделе 1 уравнений (1, 5) дальности радиолокации и радиосвязи для свободного пространства получить выражения для расчета зависимости мощности сигнала на входе приемного устройства РЛС $P_{ПР.\ РЛС}$ от дальности D при обнаружении пассивных объектов и объектов, на которых установлены отражатель или РЛО.

б) По полученным выражениям в соответствии с индивидуальным заданием (таблица 3) рассчитать и построить в одной координатной системе для заданной РЛС графики зависимости мощности сигнала на входе приемника $P_{ПР.\ РЛС}$ в диапазоне дальностей от $D_{МАКС}$ до $D_{МИН}$ при обнаружении спасательной шлюпки с ЭПР $\sigma_{ЭФФ.\ ШЛ}$, шлюпки, с установленным уголковым отражателем с треугольными гранями (длина ребра a) и шлюпки с радиолокационным ответчиком "Муссон 502".

в) Нанести на полученные графики:

– уровень минимальной пороговой мощности сигнала на входе приемника РЛС $P_{ПР.\ МИН.\ РЛС}$, достаточный для нормальной работы системы;

– границу предельной дальности действия системы $D_{ПРЕД}$, рассчитанную по формуле (6), которая зависит от высоты установки антенны РЛС $h_А$ и высоты расположения цели $h_Ц$.

г) Объяснить полученные результаты и сделать подробные выводы.

Таблица 3 — Исходные данные для индивидуального расчетного задания

Предпоследняя цифра ЗК	$\sigma_{ЭФФ.\ ШЛ}$, $м^2$	a, м	Последняя цифра ЗК	$D_{МАКС}$, км	$D_{МИН}$, км	РЛС
0	3	0,3	**0**	25	2	Лоция
1	1	0,4	**1**	35	5	Миус
2	4	0,25	**2**	40	4	Наяда
3	2	0,35	**3**	50	5	Дон
4	3	0,45	**4**	75	7	Океан
5	1	0,3	**5**	30	1	Лоция
6	4	0,4	**6**	40	4	Миус
7	2	0,25	**7**	55	2	Наяда
8	3	0,35	**8**	65	3	Дон
9	1	0,45	**9**	80	8	Океан

3.2. Экспериментальное исследование характеристик РЛО

3.2.1. Описание лабораторной установки

Лабораторная установка состоит из блока контроля и радиолокационного ответчика «Муссон-502».

В радиолокационном ответчике не установлены элементы питания. Питающее напряжение подведено к плате питания от внешнего источника питания. В радиолокационном ответчике отключено передающее устройство СВЧ модуля и вместо него к плате управления подключен резистивный эквивалент нагрузки.

На лицевой панели блока контроля установлены клеммы для подключения РЛО, клеммы для подключения внешнего источника питания, импульсного генератора и осциллографа, а также измерительные приборы для контроля напряжения подводимого к РЛО от внешнего источника питания ($U_{и.п.}$) и тока потребления, контроля выходного напряжения платы питания. На лицевой панели установлены: тумблер включения питания РЛО и переключатель «Прием-передача».

3.2.2. Экспериментальные исследования

а) Исследовать работоспособность платы питания.

Для этого подключить с учетом полярности внешний источник питания к блоку контроля. Установить напряжение источника питания равным номинальному значению напряжения питания РЛО составляющему 12 В.

Тумблер «Прием-Передача» установить в положение «Прием». Включить тумблер «Питание РЛО».

Повернуть ручку включения, расположенную на РЛО на 90º в направлении, указанном знаком « → ». В отверстии, расположенном на ручке включения, наблюдать непрерывное свечение светодиода, индицирующего о включении РЛО в режим ожидания (приема).

Определить величину выходного напряжения платы питания при номинальном напряжении, поданном на РЛО от внешнего источника питания.

Установить напряжение питания РЛО равным 14,6 В. Определить выходное напряжение платы питания. Установить пониженное напряжение питания РЛО равным 10 В и определить выходное напряжение платы питания при пониженном питающем напряжении.

Рассчитать относительное изменение выходного напряжения платы питания для пониженного (10 В) относительно номинального и повышенного (14,6 В) относительно номинального напряжений источника питания.

Примечание — Согласно техническому заданию на РЛО выходное напряжение платы питания должно оставаться в пределах 6,8 В ± 5 %.

Сделать вывод о соответствии (несоответствии) параметров платы питания исследуемого РЛО требованиям технического задания.

б) Измерить ток потребления РЛО в режиме приема.

Установить на источнике питания номинальное напряжение питания РЛО (12 В) и определить ток потребления.

Установить на источнике питания пониженное (10 В) и повышенное (14,6 В) напряжения и определить токи потребления.

Примечание: Согласно техническому заданию, ток потребления РЛО в режиме приема не должен превышать 25 мА.

в) Измерить ток потребления РЛО в режиме передачи.

Для этого подключить к блоку контроля лабораторной установки импульсный генератор.

Установить на выходе импульсного генератора запускающие импульсы отрицательной полярности амплитудой 5 В, длительностью 0,5 мкс, частота повторения запускающих импульсов — 1 кГц (период следования — 1 мс).

Установить переключатель «Прием-Передача» в положение «Передача».

Определить токи потребления РЛО при напряжениях источника питания 10 В; 12 В; 14,6 В.

Переключатель «Прием-Передача» установить в положение «Прием».

Примечание — Согласно техническому заданию ток потребления РЛО в режиме передачи не должен превышать 65 мА.

Сделать вывод о соответствии (несоответствии) величины тока потребления исследуемого РЛО в режиме передачи требованиям технического задания.

г) Исследовать работоспособность платы управления.

Для этого подключить к блоку контроля лабораторной установки осциллограф.

Установить на импульсном генераторе запускающие импульсы с такими же параметрами, как и при исследовании тока потребления РЛО в режиме передачи. Переключатель «Прием-Передача» установить в положение «Передача».

На экране осциллографа пронаблюдать пилообразно напряжение. Подсчитать количество циклов перестройки пилообразного напряжения в ответ на каждый запросный импульс.

При правильной работе РЛО в ответ на каждый запросный импульс на выход платы управления (на управляющий вход передающего устройства) должно подаваться 12 циклов изменения пилообразного напряжения с амплитудой не менее 1,5 В.

Определить длительность прямого и обратного хода пилообразного напряжения. Длительность прямого хода должна составлять 7,5 ± 1 мкс, длительность обратного хода — 0,4 ± 0,1 мкс.

Сделать вывод о соответствии (несоответствии) параметров управляющего пилообразного напряжения подаваемого на генератор управляемый напряжением, требованиям технического задания.

д) Сделать вывод о работоспособности платы питания и платы управления РЛО.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен включать:

- структурную схему РЛО;
- диаграммы, поясняющие работу РЛО;
- основные характеристики РЛО "Муссон 502";
- результаты выполнения индивидуального расчетного задания;
- результаты экспериментального исследования РЛО;
- выводы по работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1) Назначение радиолокационного ответчика. Какие функции он выполняет в системе ГМССБ?

2) Чем определяется и от чего зависит радиолокационная наблюдаемость объектов при осуществлении поисковых операций на море?

3) На каком принципе основана работа уголковых отражателей?

Почему уголковые отражатели при относительно малых размерах имеют сравнительно большую эффективную отражающую площадь?

4) Назовите максимальные дальности обнаружения с помощью судовых РЛС спасательной шлюпки, уголкового отражателя и радиолокационного ответчика.

5) Перечислите основные технические характеристики радиолокационного ответчика «Муссон 502».

6) Из каких основных блоков состоит РЛО? Каково их назначение?

7) В каких режимах может работать РЛО? Какова нормативная продолжительность работы в каждом из режимов без замены элементов питания?

8) Как производится включение и выключение РЛО? Поясните особенности индикации в режимах ожидания и излучения ответных сигналов. Как происходит переключение РЛО из режима ожидания в режим передачи ответных сигналов?

9) Поясните работу радиолокационного ответчика по структурной схеме

10) В чем заключается и как проводится техническое обслуживание?

11) Поясните порядок проверки работоспособности РЛО совместно с радиолокатором судна.

12) Поясните порядок замены элементов питания.

13) Перечислите меры безопасности при работе с литиевыми элементами питания.

14) Перечислите требования к установке РЛО на судне и спасательных плавсредствах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Широков Ю. Ф. Основы теории радиолокационных систем [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / Ю. Ф. Широков. — Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2012. — 129 с.

2. Радиолокационные системы [Электронный ресурс] : учебник / В. П. Бердышев, Е. Н. Гарин, А. Н. Фомин [и др.]; под общ. ред. В. П. Бердышева. — Красноярск: СФУ, 2012. — 402 с.

3. Горохов А.Х. Основы радиолокации и элементы РЛС: учеб. пособие / А.Х. Горохов, Н.Л. Кашпур. — Самара: Самарский гос. техн. университет 2014. — 247 с.

4. Радиотехнические системы: учебник для вузов / Ю.М. Казаринов [и др.] ; под ред. Ю.М. Казаринова. — М.: Высш. шк., 1990. — 496 с.

5. Чердынцев В.А. Радиотехнические системы: учеб. пособие для вузов / В.А. Чердынцев. — Мн: Выш. шк., 1988. — 369 с.

6. Финкельштейн М.И. Основы радиолокации: учеб. пособие для вузов / М.И. Финкельштейн. — М.: Радио и связь, 1983. — 536 с.

7. Васин В.В. Справочник-задачник по радиолокации / В.В. Васин, Б.М. Степанов. — М.: Советское радио, 1977. — 320 с.

8. Васильев В.Н. Морская навигационная РЛС «Лоция» / В.Н. Васильев. — М.: Транспорт, 1984. — 120 с.

Приложение А
Основные технические характеристики судовых навигационных РЛС

Примечание: 1 морская миля = 1,852 км.

Таблица А1 – Технические характеристики навигационной РЛС "Лоция"

Техническая характеристика	Величина
Рабочая частота	9375 МГц
Импульсная мощность передатчика на шкалах дальности (4; 8; 16 миль)	4,5 кВт
Длительность зондирующих импульсов на шкалах (4; 8; 16 миль)	0,3 мкс
Минимальная пороговая мощность сигнала на входе приемника РЛС	минус 115 дБ/Вт
Коэффициент усиления антенны	700

Таблица А2 – Технические характеристики навигационной РЛС "Миус"

Техническая характеристика	Величина
Рабочая частота	9400 —9460 МГц
Импульсная мощность передатчика на шкалах дальности (8; 16; 24 мили)	7 кВт
Длительность зондирующих импульсов на шкалах (8; 16; 24 мили)	0,3 мкс
Минимальная пороговая мощность сигнала на входе приемника РЛС	минус 117 дБ/Вт
Коэффициент усиления антенны	1100

Таблица А3 – Технические характеристики навигационной РЛС "Наяда 5"

Технические характеристики	Величина
Рабочий диапазон частот	9400—9460 МГЦ
Импульсная мощность передатчика	12 кВт
Длительность зондирующих импульсов на шкалах дальности (4; 8 миль) на шкалах дальности (16; 32; 64 мили)	0,25 мкс 0,7 мкс
Минимальная пороговая мощность сигнала на входе приемника РЛС	минус 120 дБ/Вт
Коэффициент усиления антенны	1200

Таблица А4 – Технические характеристики навигационной РЛС "Дон"

Техническая характеристика	Величина
Рабочая частота	9400—9460 МГц
Импульсная мощность передатчика	85 кВт
Длительность зондирующих импульсов на шкалах (15; 30; 50 миль)	1,0 мкс
Минимальная пороговая мощность сигнала на входе приемника РЛС	минус 118 дБ/Вт
Коэффициент усиления антенны	1300

Таблица А5 – Технические характеристики навигационной РЛС "ОКЕАН"

Техническая характеристика	Величина
Рабочая частота 1 диапазон (λ = 3,2 см) 2 диапазон (λ = 10 см)	9400—9460 МГц 3030—3090 МГц
Импульсная мощность передатчика (λ = 3,2 см) на шкалах дальности (8; 16; 32; 64 мили)	50 кВт
Длительность зондирующих импульсов на шкалах (8; 16; 32; 64 мили)	0,5 мкс
Минимальная пороговая мощность сигнала на входе приемника РЛС	минус 122 дБ/Вт
Коэффициент усиления антенны (λ = 3,2 см) (λ = 10 см)	1260 500

Приложение Б
Пример расчета энергетических характеристик РЛС

Расчет мощности сигнала на входе преемника РЛС "Наяда", при отражении сигнала от шлюпки на дальности 10 км (для свободного пространства):

$$P_{\text{ВХ.ПР.}} = \frac{P_{\text{И.РЛС}}\, G_{\text{РЛС}}^{2}\, \sigma_{\text{ЭФФ}}\, \lambda^{2}}{64\,\pi^{3}\, D_{\text{МАКС}}^{4}} = \frac{12\cdot 10^{3}\cdot 1200^{2}\cdot 3\cdot 0{,}032^{2}}{64\cdot 3{,}14^{3}\cdot\left(10\cdot 10^{3}\right)^{4}} \approx 2{,}5\cdot 10^{-12}\ \text{Вт}.$$

Расчет мощности сигнала на входе преемника РЛС "Наяда", при отражении сигнала от уголкового отражателя на дальности 10 км (для свободного пространства):

$$P_{\text{ВХ.ПР.}} = \frac{P_{\text{И.РЛС}}\, G_{\text{РЛС}}^{2}\, \sigma_{\text{ЭФФ}}\, \lambda^{2}}{64\,\pi^{3}\, D_{\text{МАКС}}^{4}} = \frac{12\cdot 10^{3}\cdot 1200^{2}\cdot 33\cdot 0{,}032^{2}}{64\cdot 3{,}14^{3}\cdot\left(10\cdot 10^{3}\right)^{4}} \approx 2{,}75\cdot 10^{-11}\ \text{Вт}.$$

Расчет мощности сигнала на входе преемника РЛС "Наяда" при приеме сигнала от радиолокационного ответчика на дальности 10 км (для свободного пространства):

$$P_{\text{ВХ.ПР.}} = \frac{P_{\text{И.РЛО}}\, G_{\text{РЛС}}\, G_{РЛО}\, \lambda^{2}}{16\,\pi^{2}\, D_{\text{МАКС}}^{2}} = \frac{0{,}4\cdot 1200\cdot 4\cdot 0{,}032^{2}}{16\cdot 3{,}14^{2}\cdot\left(10\cdot 10^{3}\right)^{2}} \approx \frac{1{,}92}{1{,}58\cdot 10^{10}} \approx 1{,}22\cdot 10^{10}\ \text{Вт}.$$

Результаты расчета мощности сигнала на входе преемника РЛС "Наяда" при работе системы в реальной атмосфере. В реальных условиях при поглощении энергии радиоволн в дожде или тумане уровень принимаемого сигнала существенно снижаться

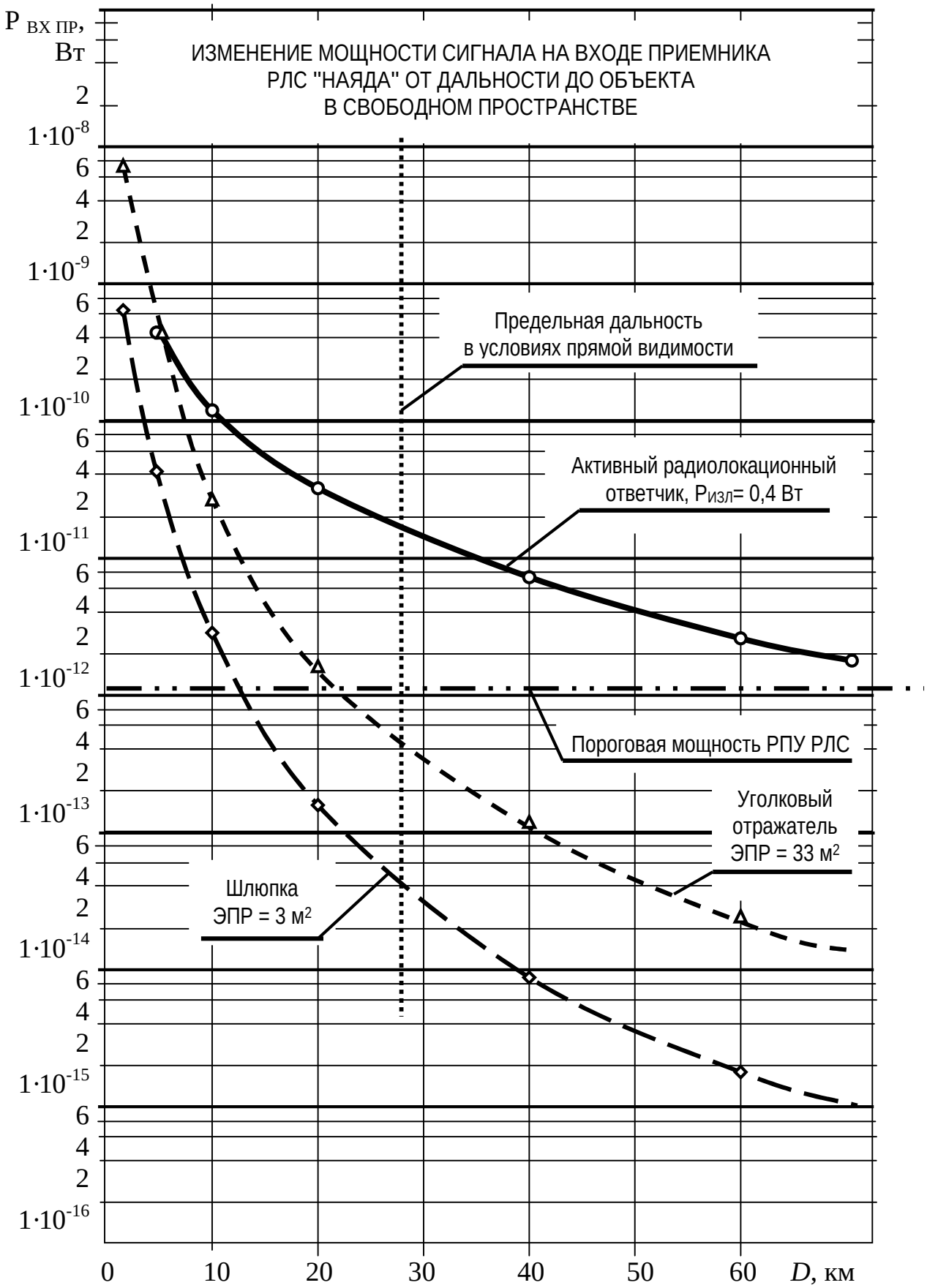
Шлюпка, ЭПР = 3 м^2						
$D_{МАКС}$	60 км	40 км	20 км	10 км	5 км	2,5 км
$P_{ВХ\ ПР}$	$1{,}8\cdot 10^{-15}$	$9\cdot 10^{-15}$	$1{,}5\cdot 10^{-13}$	$2{,}5\cdot 10^{-12}$	$4\cdot 10^{-11}$	$6{,}4\cdot 10^{-10}$

Уголковый отражатель с треугольными гранями а = 0,3 м , ЭПР = 33 м^2						
$D_{МАКС}$	60 км	40 км	20 км	10 км	5 км	2,5 км
$P_{ВХ\ ПР}$	$2{,}12\cdot 10^{-14}$	$1{,}07\cdot 10^{-13}$	$1{,}72\cdot 10^{-12}$	$2{,}75\cdot 10^{-11}$	$4{,}4\cdot 10^{-10}$	$7{,}01\cdot 10^{-9}$

Радиолокационный ответчик, канал ответа $P_{ИЗЛ}$ = 400 мВт						
$D_{МАКС}$	80 км	60 км	40 км	20 км	10 км	5 км
$P_{ПР}$	$1{,}9\cdot 10^{-12}$	$2{,}7\cdot 10^{-12}$	$7{,}62\cdot 10^{-12}$	$3{,}05\cdot 10^{-11}$	$1{,}22\cdot 10^{-10}$	$4{,}88\cdot 10^{-10}$

При высоте установки антенны РЛС 30 метров и высоте цели над поверхностью моря 2 метра пороговая дальность по формуле (6) составляет 28,25 км.

Приложение В
Графики расчета энергетических характеристик РЛС



У ч е б н о е и з д а н и е

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИИ С АКТИВНЫМ ОТВЕТОМ

Учебно-методическое пособие

Составители: **Лукьянчук** А.Г., **Мельников** А.В.,
Поляков А.Л.

В авторской редакции

Изд. № 62/18. Объем 1,5 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»