

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра «Радиоэлектронные системы и технологии»

Т Е О Р И Я РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ

Учебно-методическое пособие
к выполнению практических заданий по дисциплине
для обучающихся очной и заочной форм обучения специальности
11.05.01 – Радиоэлектронные системы и комплексы,
направления 11.04.01 – Радиотехника

Севастополь
СевГУ
2022

УДК 621.396.933:656.7.052(076.5)

ББК 32.95я73

ТЗЗ

Р е ц е н з е н т :

И.Л. Афонин - д-р техн. наук, профессор

Ответственный за выпуск:

И.Л. Афонин - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой
«Радиоэлектронные системы и технологии»

Составитель : А.Л. Поляков

ТЗЗ Теория радионавигационных систем и комплексов : учебно-методическое пособие к выполнению практических заданий по дисциплине для обучающихся очной и заочной форм обучения специальности 11.05.01 – Радиоэлектронные системы и комплексы, направления 11.04.01 – Радиотехника / Севастопольский государственный университет, Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, кафедра «Радиоэлектронные системы и технологии» ; сост. А.Л. Поляков. – Севастополь: СевГУ, 2022. – 35 с. – Текст : электронный.

Цель учебно-методического пособия: помочь обучающимся в изучении порядка расчётов погрешностей при решении навигационных задач (определение координат движущегося объекта, направления его движения, скорости, выбор курса и т.д.) различными позиционными методами (дальномерным, угломерным, угломерно-дальномерным, разностно-дальномерным).

УДК 621.396.933:656.7.052(076.5)
ББК 32.95я73

Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии», протокол № 2 от 15 сентября 2022 года.

Рекомендовано к изданию на заседании ученого совета Института радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем, протокол № 2 от 15 сентября 2022 года.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2022

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Расчетно-практическое задание № 1. Расчет рабочих зон и погрешностей местоопределения объектов в угломерных РН системах	
1.1. Основные теоретические сведения	5
1.2. Методические рекомендации по выполнению расчётного задания	8
1.3. Порядок выполнения расчётного-практического задания.....	11
1.4. Контрольные вопросы	12
2. Расчетно-практическое задание № 2. Расчет рабочих зон и погрешностей местоопределения объектов в дальномерных РН системах	13
2.1. Основные теоретические сведения	13
2.2. Методические рекомендации по выполнению расчётного задания	14
2.3. Порядок выполнения расчётного-практического задания.....	16
2.4. Контрольные вопросы	17
3. Расчетно-практическое задание № 3. Расчет рабочих зон и погрешностей местоопределения объектов в угломерно-дальномерных РН системах.....	18
3.1. Основные теоретические сведения	18
3.2. Методические рекомендации по выполнению расчётного задания	18
3.3. Порядок выполнения расчётного-практического задания.....	19
3.4. Контрольные вопросы	20
4. Расчетно-практическое задание № 4. Расчет рабочих зон и погрешностей местоопределения объектов в разностно-дальномерных РН системах.....	21
4.1. Основные теоретические сведения	21
4.2. Методические рекомендации по выполнению расчётного задания	22
4.3. Порядок выполнения расчётного-практического задания.....	24
4.4. Контрольные вопросы	25
5. Расчетно-практическое задание № 5. Расчет эффективности обнаружения объектов РЛ с пассивным ответчиком	26
5.1. Основные теоретические сведения	26
5.2. Методические рекомендации по выполнению расчётного задания	27
5.3. Порядок выполнения расчётного-практического задания.....	27
5.4. Контрольные вопросы	28
6. Расчетно-практическое задание № 6. Расчет эффективности обнаружения объектов РЛ с активным ответчиком	29
6.1. Основные теоретические сведения	29
6.2. Методические рекомендации по выполнению расчётного задания	30
6.3. Порядок выполнения расчётного-практического задания.....	32
6.4. Контрольные вопросы	33
Библиографический список.....	34

ВВЕДЕНИЕ

Учебной программой дисциплины «Теория радионавигационных систем и комплексов» предусмотрено выполнение девяти расчетно-практических работ по индивидуальным заданиям.

Целью выполнения расчетно-практических работ является закрепление полученных теоретических знаний по различным позиционным методам определения местоположения навигационных объектов, проанализировать, в сравнении, точностные характеристики РН систем, построенных на различных принципах определения навигационных параметров, получение твёрдых практических навыков в расчетах погрешностей определения координат объектов при различных позиционных методах измерений.

По каждому из заданий предусмотрено выполнение теоретического расчёта погрешностей измерения местоположения объекта при заданных методах построения радионавигационной системы (РНС):

- дальномерном (Д РНС);
- угломерном (У РНС);
- угломерно-дальномерном (УД РНС);
- разностно-дальномерном (РД РНС).

Расчетно-практическое задание № 7 предполагает проведение оценки энергетических характеристик спутниковых радионавигационных систем.

Выбор варианта задания производится каждым обучающимся по последней цифре номера зачетной книжки в соответствии с таблицей.

Отчет о выполнении каждой расчетно-практической работы должен быть выполнен согласно требованиям методических указаний по оформлению текстовых работ [1], содержать формулировку задания, исходные данные по расчёту, формулы, таблицы, графики. В конце отчета должны быть сделаны выводы по каждому пункту задания, а при необходимости и рекомендации по практическому применению полученных результатов.

Расчетно-практическое задание № 1
РАСЧЕТ РАБОЧИХ ЗОН И ПОГРЕШНОСТЕЙ
МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
В УГЛОМЕРНЫХ РН СИСТЕМАХ

1.1. Основные теоретические сведения

Радионавигация – это область науки и техники, охватывающая радиотехнические методы и средства вождения воздушных и морских судов, космических аппаратов и других движущихся объектов.

Навигационным параметром (НП) называют геометрическую величину, позволяющую определить координаты и параметры движения объекта (дальность до маяка, направление на маяк, скорость сближения и т.п.).

Радионавигационным параметром (РНП) называют параметр радиосигнала (время, частоту, фазу, амплитуду сигнала), по которому оценивают НП.

Навигационный параметр – дальность до объекта или до радиомаяка может быть измерена по временному запаздыванию сигнала между моментом его излучения и приема. Это временное запаздывание пропорционально скорости распространения радиоволн в свободном пространстве $c \approx 300 \cdot 10^6$ м/с. При этом используются свойства прямолинейного распространения радиоволн и постоянства скорости их распространения. В качестве РНП при измерении дальности может выступать временное или фазовое смещение сигнала.

Навигационный параметр – направление на маяк или на объект измеряется с использованием свойства прямолинейного распространения радиоволн и направленных свойств антенны. Угловое направление на объект или маяк называется пеленгом. В качестве РНП при измерении пеленга могут использоваться амплитуда сигнала или разность фаз сигнала при приеме на разнесенные в пространстве антенны.

Навигационный параметр – скорость может определяться путем интегрирования текущих значений измеренной дальности или угловых координат. Скорость сближения с объектом или маяком (радиальная скорость) измеряется по смещению частоты принимаемого сигнала за счет эффекта Доплера. В качестве РНП при измерении радиальной скорости выступает частота сигнала.

В угломерных радионавигационных системах используется, прежде всего, направленные свойства антенны при приеме и передаче радиосигналов

Существует два варианта построения угломерных систем:

- радиопеленгаторный;
- радиомаячный.

В радиопеленгаторной системе направленной является антенна приемника (**радиопеленгатора**), а передатчик (**радиомаяк**) имеет

ненаправленную антенну. При расположении радиопеленгатора (РП) и радиомаяка (РМ) в одной плоскости, например на поверхности Земли, направление на маяк характеризуется пеленгом α (рис. 1, а).

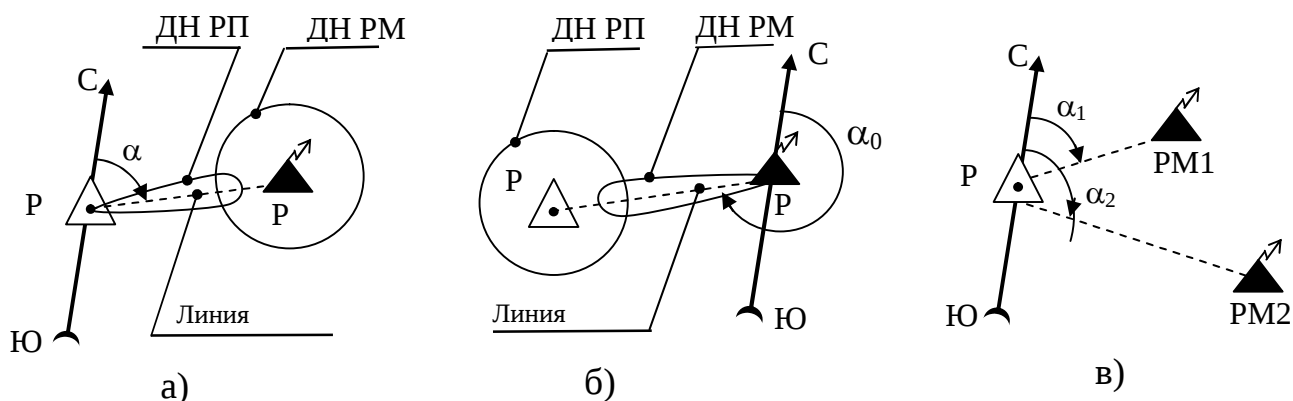


Рис. 1 – Методы построения угломерных систем:
а) радиопеленгаторный метод; б) радиомаячный метод;
в) пеленгаторное определение местоположения по двум радиомаякам

Рабочей зоной РНС называется часть пространства (поверхности) в пределах которой обеспечивается определение координат объекта с погрешностью, не превышающей максимально допустимую $\sigma_{\text{МАКС}}$.

Построим рабочую зону угломерной РНС. Пеленгатор находится на борту объекта в точке M (рис. 2), а наземные маяки расположены в пунктах A и B на расстоянии d между собой и на расстояниях D_A и D_B от объекта M , при этом линии положения пересекаются под углом α_M .

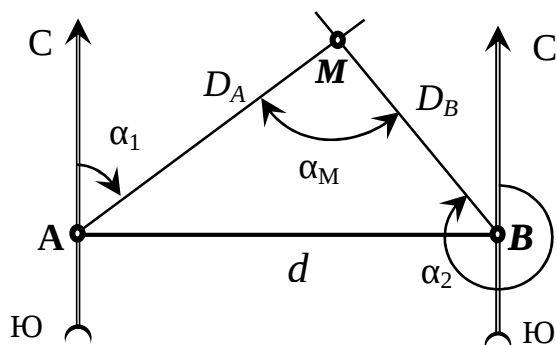


Рис. 2 – К расчету рабочих зон угломерной РНС

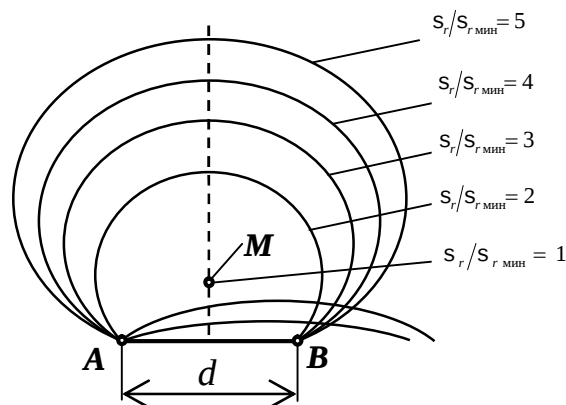


Рис. 3 – Рабочие зоны угломерной РН системы

Предположим, что измерение азимутов α_A и α_B производится с одинаковой погрешностью $\sigma_{\alpha A} = \sigma_{\alpha B} = \sigma_\alpha$, а меридианы в пунктах A , B и M – параллельны. Тогда размер базы разнесения станций d , а ошибка измерения дальности определяется выражением

$$\sigma_r = \frac{\sigma_\alpha d}{\sin \alpha_M} \sqrt{\frac{D_A^2}{d^2} + \frac{D_B^2}{d^2}}. \quad (1)$$

Для построения линии равной точности, ограничивающей рабочую зону угломерной системы, составлены таблицы, приведенные в специальных пособиях по радионавигации. Кривые равной точности угломерной системы располагаются симметрично относительно базы d , но они отличаются от окружностей и не все проходят через точки A и B . См. рис. 3.

В частности, при $\alpha_M = 109^\circ 28'$ кривые равной точности сжимаются в точку, лежащую на нормали, к середине базы d на расстоянии, равном $d/2\sqrt{3}$ по обе стороны от нее. В этих точках погрешность местоопределения минимальна:

$$\sigma_{r \text{ мин}} = 0,95 \sigma_\alpha d. \quad (2)$$

Для всех остальных точек рабочей зоны угломерной системы погрешность определения местоположения хуже.

Местоположение объекта позиционным методом на земной поверхности определяется как точка пересечения не менее двух линий положения различных семейств. Если объект M находится на значительном расстоянии от наземных станций, то погрешности Δl_1 и Δl_2 определения пересекающихся линий положения AE и BH (рис. 4) считают малыми по сравнению с расстояниями D_A и D_B от объекта до станций A и B , а линии положения AE' и BH' , полученные в результате измерения, параллельны линиям AE и BH .

Точка M' , соответствующая оценке положения объекта, найденная в результате измерения, оказывается на расстоянии, от точки M , отражающей истинное положение объекта. Таким образом, расстояние r , есть *радиальная погрешность* измерения.

Так как линейные погрешности $\Delta l_A \approx \Delta \alpha_A D_A$ и $\Delta l_B \approx \Delta \alpha_B D_B$ перпендикулярны линиям положения и являются случайными величинами, то случайна и радиальная погрешность r и ее среднеквадратическое значение равно:

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{(\sigma_{\alpha A} D_A)^2 + (\sigma_{\alpha B} D_B)^2}}{\sin \alpha_M}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\alpha A}$, $\sigma_{\alpha B}$ – среднеквадратическая погрешность измерения угловой координаты станциями A и B ; α_M – угол, под которым пересекаются линии положения.

Таким образом, точность нахождения местоположения растет при уменьшении погрешностей измерения угловой координаты, уменьшения дальности и приближения угла пересечения линий положения α_M к 90° . Если оценка погрешностей на основе приближенных формул недостаточна, то используют более полные статистические характеристики, позволяющие оценить вероятность того, что расчетная точка пересечения двух линий положения находится в пределах области, называемой *эллипсом погрешностей*

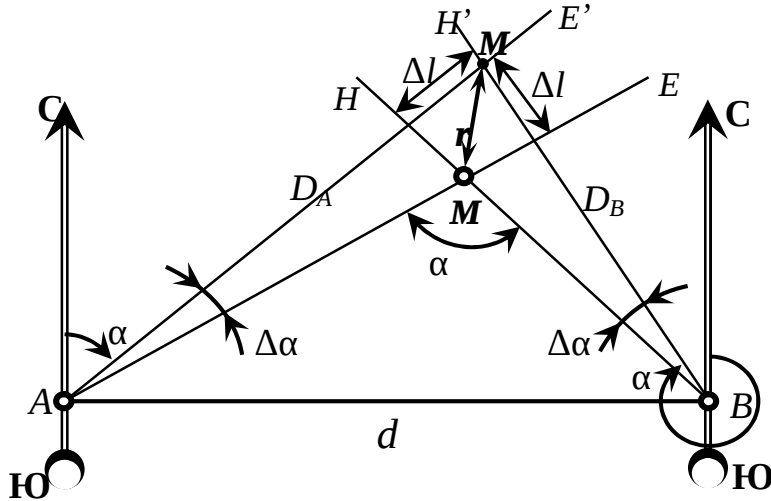


Рис. 4. Оценка погрешности определения местоположения объекта угломерными методами

Ориентировка эллипса погрешностей зависит от погрешностей измерения линий положения и угла пересечения линий положения α_M .

В случае одинаковой точности определения линий положения, и одинаковых дальностей до объекта от наземных станций одна их полуосей эллипса совпадает с биссектрисой угла α_M , а вторая полуось будет параллельна базовой линии d .

При $\alpha_M = 90^\circ$ эллипс погрешностей превращается в окружность.

1.2. Методические рекомендации по выполнению расчетного задания

При радионавигационных измерениях вводятся дополнительные понятия.

Поверхность положения – геометрическое место точек в пространстве, соответствующих какому-то одному значению навигационного параметра. При измерении угловых координат поверхность положения представляет собой плоскость, все точки которой имеют одинаковое направление – одинаковый пеленг

Линия положения – линия пересечения двух поверхностей положения, при измерении двух угловых координат и пересечении двух поверхностей положения (плоскостей) линия положения представляет собой прямую.

При использовании двух дальномерных измерений поверхность пересечения двух сферических поверхностей или сферической поверхности с плоскостью линия положения представляет собой окружность (рис. 5)

Место положения – точка пересечения трёх поверхностей положения. Что позволяет однозначно определить координаты объекта. На рис. 5 место положения обозначено M_1 и M_2 .

Достоинством использования поверхностей и линий положения является то, что определение места положения объекта происходит без учета и даже, без знания, пройденного им ранее пути.

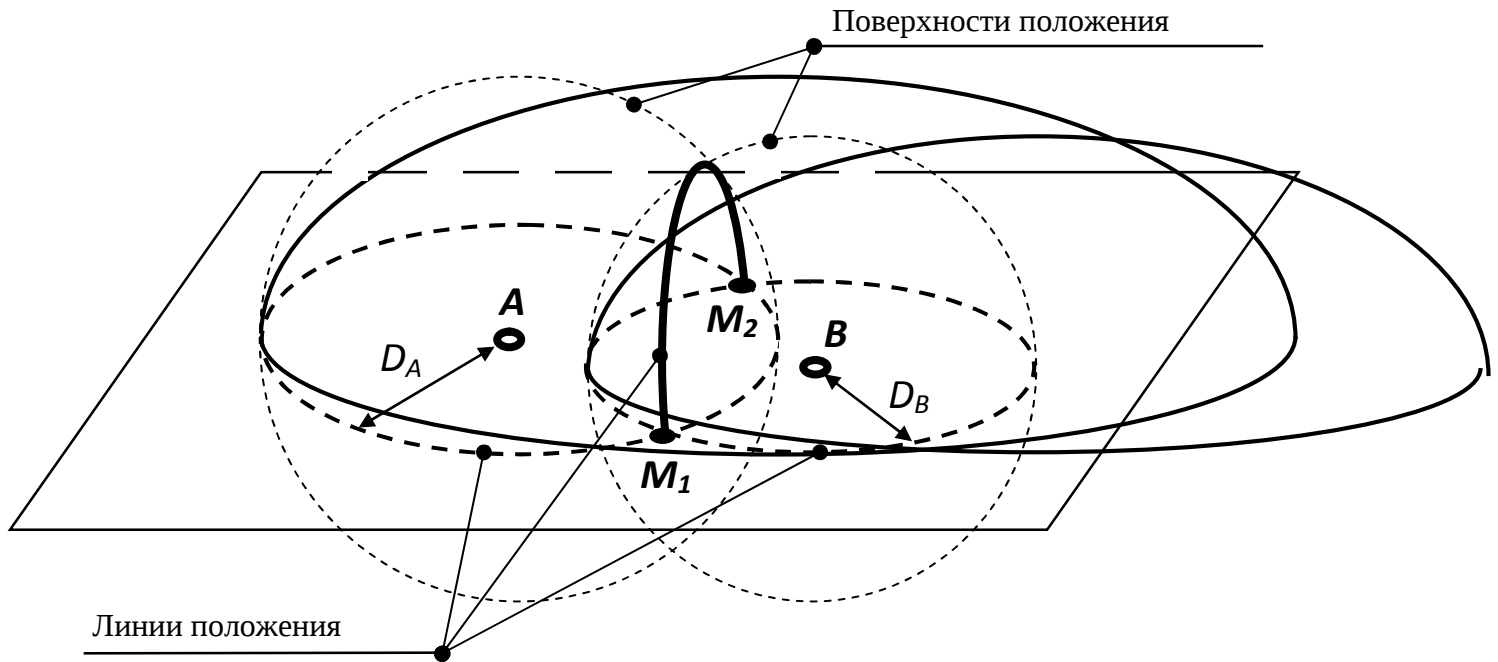


Рис. 5 – Принцип формирования поверхностей положения, линий положения и места положения объекта M по результатам измерения дальности до объекта от двух наземных станций A и B

Местоположение объекта позиционным методом определяется как точка пересечения, по крайней мере, двух линий положения различных семейств. Погрешность определения линий положения приводит к погрешности нахождения координат объекта. Если объект M находится на значительном расстоянии от наземных станций, то погрешности Δl_1 и Δl_2 определения пересекающихся линий положения A и B (Рис.6) считаются малыми по сравнению с расстояниями от объекта до станций, а линии положения A' и B' , полученные в результате измерения, параллельными линиям положения A и B .

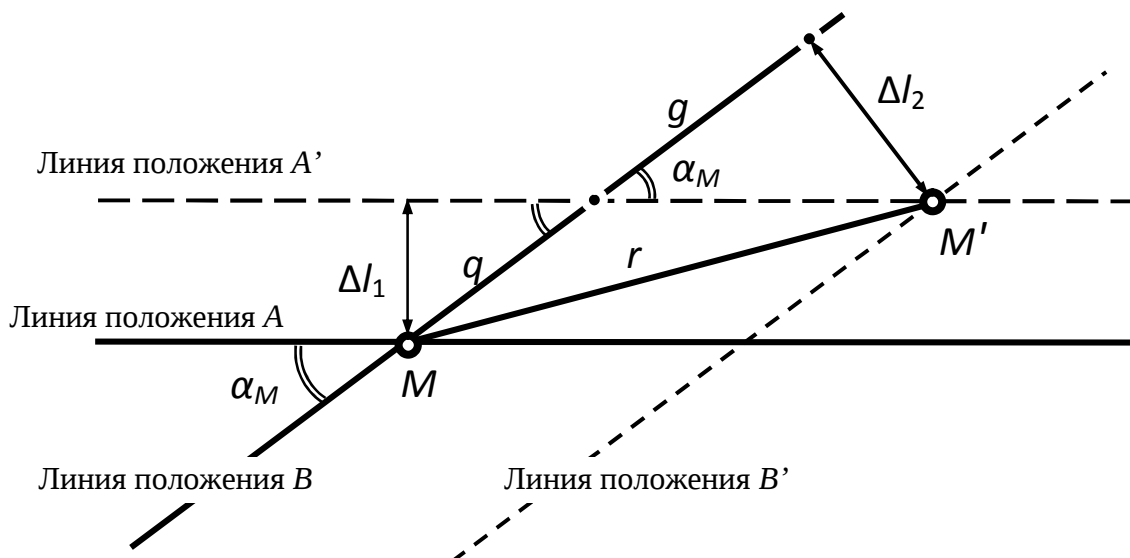


Рис. 6 – К определению погрешности РТСН

Точка M' , соответствующая оценке положения объекта, найденной в результате измерения, оказывается на расстоянии r от точки M , отражающей

истинное положение объекта. Таким образом, расстояние r есть радиальная погрешность измерения. Так как Δl_1 и Δl_2 перпендикулярны линиям положения, то, согласно рис. 1.6, радиальная погрешность равна

$$r = \sqrt{\Delta l_2^2 + (q + g)^2}; \quad (4)$$

где $q = \frac{\Delta l_1}{\sin \alpha_M}; \quad g = \frac{\Delta l_2}{\operatorname{tg} \alpha_M}.$

Подставим эти значения в формулу (4)

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\Delta l_2^2 + q^2 + 2qg + g^2} = \\ &= \sqrt{\Delta l_2^2 \frac{\sin^2 \alpha_M}{\sin^2 \alpha_M} + \frac{\Delta l_1^2}{\sin^2 \alpha_M} + \frac{2 \Delta l_1 \Delta l_2 \cos \alpha_M}{\sin \alpha_M \sin \alpha_M} + \frac{\Delta l_2^2 \cos^2 \alpha_M}{\sin^2 \alpha_M}}. \end{aligned}$$

Учтем, что $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$, тогда

$$r = \frac{\sqrt{\Delta l_2^2 + \Delta l_1^2 + 2 \Delta l_1 \Delta l_2 \cos \alpha_M}}{\sin \alpha_M} \quad (5)$$

где α_M – угол, под которым пересекаются линии положения в точке M .

Так как погрешности Δl_1 и Δl_2 – величины случайные, то случайна и радиальная погрешность r и её среднеквадратическое значение можно определить как

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2 + 2 \sigma_1 \sigma_2 \rho \cos \alpha_M}}{\sin \alpha_M}, \quad (6)$$

где ρ – коэффициент взаимной корреляции погрешностей определения линий положения A, A' и B, B' .

При некоррелированности погрешностей σ_1 и σ_2 измерений линий положения $\rho = 0$, и среднеквадратическое значение погрешности измерения местоположения

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}}{\sin \alpha_M}. \quad (7)$$

Таким образом, точность нахождения местоположения растет при уменьшении погрешностей определения линий положения σ_1 и σ_2 и приближении угла пересечения линий положения α_M к 90° .

Если оценка погрешностей на основе приближенных формул недостаточна, то используют более полные статистические характеристики, позволяющие оценить вероятность того, что расчетная точка пересечения двух линий положения находится в пределах области, называемой эллипсом погрешностей или эллипсом рассеяния.

Ориентировка эллипса погрешностей зависит от погрешностей измерения линий положения σ_1 и σ_2 и угла пересечения линий положения α_M .

В случае одинаковой точности определения линий положения, σ_1 и σ_2 большая полуось эллипса r совпадает с биссектрисой угла α_M . При $\alpha = 90^\circ$ эллипс превращается в окружность.

1.3. Порядок выполнения расчетно-практического задания

а) В соответствии с индивидуальным заданием произвести расчет погрешностей измерения местоположения объекта при угломерном методе построения радионавигационной системы, произвести расчет и построение рабочих зон угломерной РНС

б) Расчет произвести для нескольких значений в заданных диапазонах дальностей от объекта до базовых станций РНС.

в) Результаты расчета представить в виде таблиц и графиков изменения погрешностей измерения местоположения объекта и изобразить схему расположения точек в пространстве, соответствующих рассчитанным значениям погрешностей.

г) Проанализировать полученные результаты и сделать подробные выводы.

Таблица 1 – Выбор вариантов заданий

Последняя цифра зачётной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номер варианта задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Таблица 2 – Исходные данные для выполнения задания

Номер варианта	Расстояние между базовыми станциями	Погрешности измерения НП	Диапазон расстояний от объекта до базовых станций
1	$d = 10$ км	$\sigma_{\alpha A} = 2,1^\circ$ $\sigma_{\alpha B} = 1,4^\circ$	$D_A = 15 \dots 30$ км $D_B = 15 \dots 30$ км
2	$d = 15$ км	$\sigma_{\alpha A} = 1,7^\circ$ $\sigma_{\alpha B} = 2,0^\circ$	$D_A = 20 \dots 50$ км $D_B = 20 \dots 50$ км
3	$d = 20$ км	$\sigma_{\alpha A} = 1,7^\circ$ $\sigma_{\alpha B} = 2,1^\circ$	$D_A = 10 \dots 50$ км $D_B = 10 \dots 50$ км
4	$d = 25$ км	$\sigma_{\alpha A} = 1,9^\circ$ $\sigma_{\alpha B} = 1,4^\circ$	$D_A = 20 \dots 80$ км $D_B = 20 \dots 80$ км
5	$d = 30$ км	$\sigma_{\alpha A} = 2,0^\circ$ $\sigma_{\alpha B} = 1,6^\circ$	$D_A = 20 \dots 100$ км $D_B = 20 \dots 100$ км
6	$d = 35$ км	$\sigma_{\alpha A} = 1,8^\circ$ $\sigma_{\alpha B} = 2,1^\circ$	$D_A = 40 \dots 85$ км $D_B = 40 \dots 60$ км
7	$d = 38$ км	$\sigma_{\alpha A} = 1,5^\circ$ $\sigma_{\alpha B} = 1,9^\circ$	$D_A = 10 \dots 85$ км $D_B = 10 \dots 85$ км
8	$d = 40$ км	$\sigma_{\alpha A} = 1,4^\circ$ $\sigma_{\alpha B} = 1,8^\circ$	$D_A = 30 \dots 90$ км $D_B = 30 \dots 80$ км
9	$d = 42$ км	$\sigma_{\alpha A} = 2,2^\circ$ $\sigma_{\alpha B} = 2,0^\circ$	$D_A = 30 \dots 100$ км $D_B = 30 \dots 100$ км
10	$d = 45$ км	$\sigma_{\alpha A} = 1,6^\circ$ $\sigma_{\alpha B} = 2,0^\circ$	$D_A = 10 \dots 100$ км $D_B = 10 \dots 100$ км

1.4. Контрольные вопросы

1. Что такое радионавигация?
2. Назовите основную задачу радионавигации.
3. Какие технические средства применяются в радионавигации?
4. Что такое поверхность положения?
5. Что такое линия положения?
6. Что такое место положения?
7. Дайте классификацию радионавигационных систем.
8. Назовите основные технические и тактические характеристики РНС.
9. От каких параметров зависит погрешность определения местоположения?
10. Достоинства и недостатки угломерного радиопеленгаторного метода определения местоположения объекта.
11. Достоинства и недостатки угломерного радиомаячного метода определения местоположения объекта.
12. От чего зависят погрешности амплитудных методов измерения угловых координат объектов (метод максимума, метод минимума, равносигнальный метод).

Расчётно-практическое задание № 2 РАСЧЕТ РАБОЧИХ ЗОН И ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ДАЛЬНОМЕРНЫХ РН СИСТЕМАХ

2.1. Основные теоретические сведения

Дальномерный метод основан на измерении расстояний D_A и D_B от базовых станций A и B до местоположения объекта M . В радионавигации дальномеры работают с активным ответным сигналом, излучаемым передатчиком ответчика M при приеме запросного сигнала. Если время распространения сигналов запроса t_3 и ответа t_0 одинаково, а время формирования ответного сигнала в ответчике пренебрежимо мало, то измеряемая дальность $D = c(t_3 + t_0)/2$. В качестве ответного сигнала может быть использован также сигнал, отраженный объектом, что используется при измерении дальности РЛС или высоты радиовысотомером.

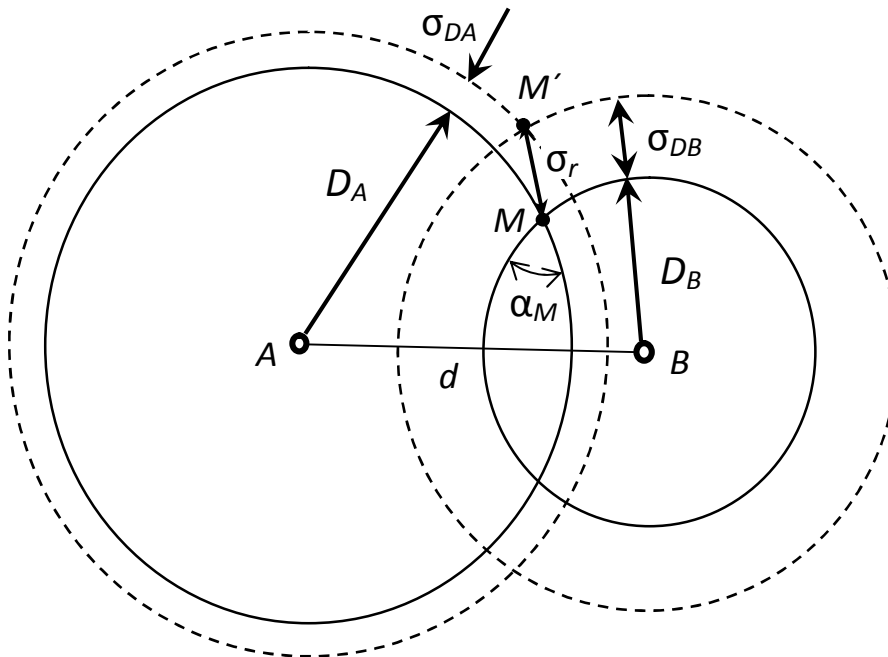


Рис. 7. Оценка погрешности определения местоположения объекта
дальномерным позиционным методом

Поверхностью положения дальномерной системы является поверхность шара радиусом D (рис. 7). Линиями положения на фиксированной плоскости либо сфере (например, на поверхности Земли) будут окружности, поэтому иногда дальномерные системы называют **круговыми**. При этом местоположение объекта определяется как точка пересечения двух линий положения. Так как окружности пересекаются в двух точках, то возникает двусмысленность отсчета (рис. 8), для исключения которой применяют дополнительные средства ориентирования, точность которых может быть

невысокой, но достаточной для достоверного выбора одной из двух точек пересечения.

Поскольку измерение времени задержки сигнала может производиться с достаточно малыми погрешностями, дальномерные РНС (по сравнению с угломерными РНС) позволяют найти координаты объекта с более высокой точностью чем угломерные.

Среднеквадратичная ошибка (см. рис. 7) определения местоположения объекта M с помощью дальномерной системы, состоящей из двух базовых станций A и B , разнесенных в пространстве на расстояние d , рассчитывается на основании(8).

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_{DB}^2 + \sigma_{DA}^2}}{\sin \alpha_M} \quad (8)$$

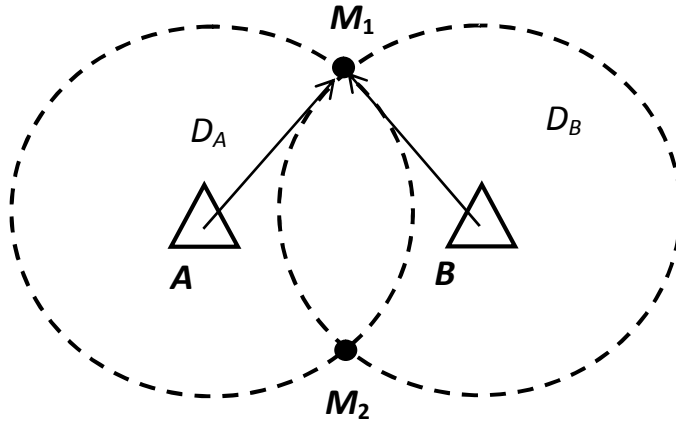


Рис. 8. Пояснение двузначности отсчета на поверхности в дальномерной РНС

2.2. Методические рекомендации по выполнению расчётно-практического задания

Среднеквадратичная ошибка σ_r определения местоположения с помощью дальномерной системы (рис. 7) составляет

$$\sigma_r = \frac{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}}{\sin \alpha_M} = \frac{\sqrt{\sigma_{DA}^2 + \sigma_{DB}^2}}{\sin \alpha_M}, \quad (9)$$

где σ_{DA} , σ_{DB} – среднеквадратичные ошибка измерения дальности;
 α_M – внутренний угол пересечения линий положения.

Если погрешности измерения дальности станций A и B одинаковы, то

$$\sigma_r = \frac{\sigma_D \sqrt{2}}{\sin \alpha_M}. \quad (10)$$

Рабочая зона дальномерной РНС это область пространства (поверхности) в пределах которой обеспечивается определение координат объекта с погрешностью, не превышающей максимально допустимую $\sigma_{\text{МАКС}}$.

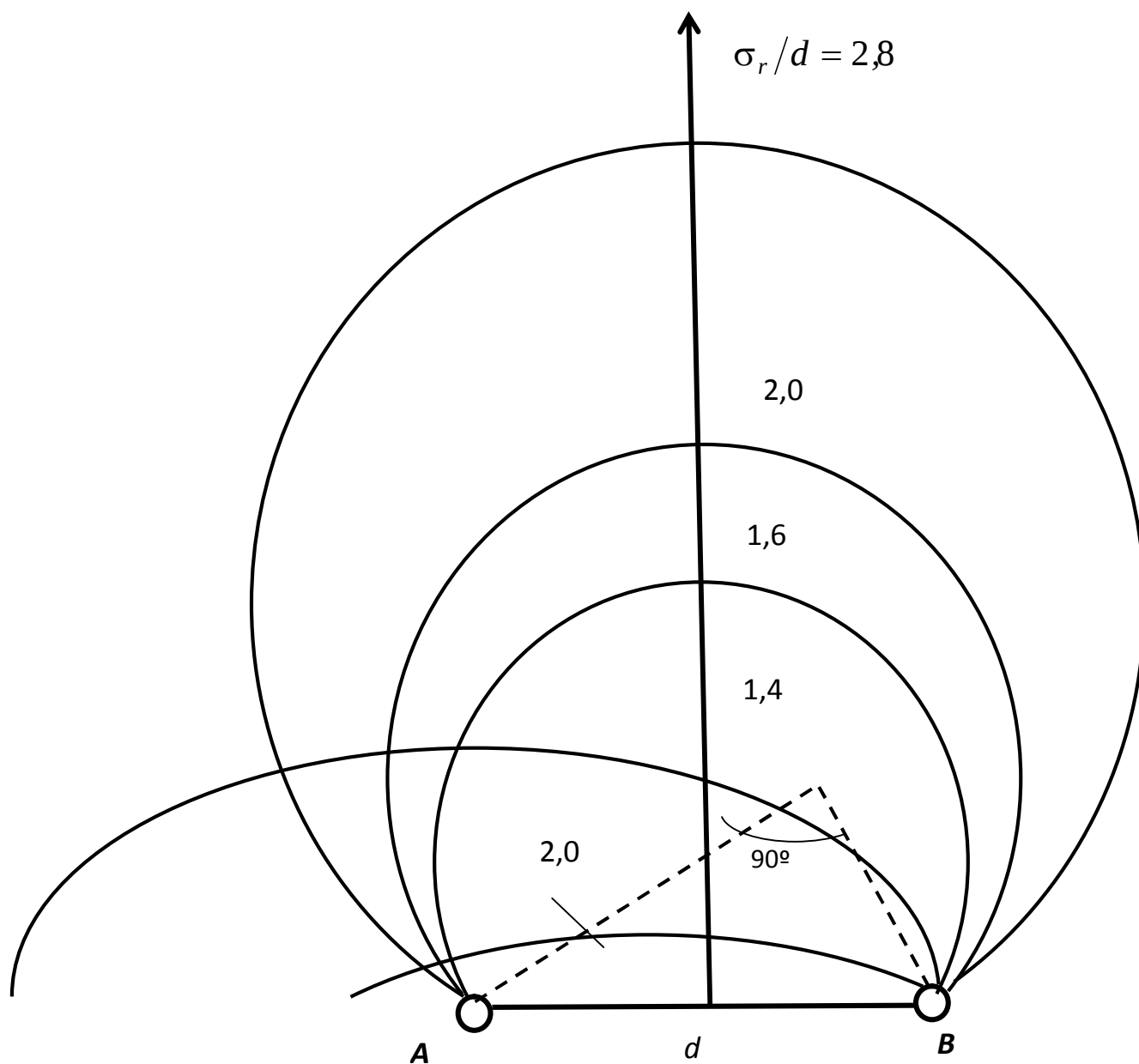


Рис. 9. Рабочие зоны дальномерной системы

Линии равной точности представляют собой окружности, проходящие через точки размещения наземных станций (рис. 9). Наилучшая точность соответствует расположению расчетной точки M на окружности, диаметром которой является база станций d (расстояние между наземными станциями). Этой ситуации соответствует угол пересечения $\alpha_M = 90^\circ$.

В радионавигации дальномеры часто работают с активным ответным сигналом, излучаемым антенной передатчика ответчика при приеме запросного сигнала.

Если известно время распространения сигнала запроса t_3 и сигнала ответа t_o , а время запаздывания формирования ответного сигнала в ответчике $t_{\text{форм}}$, то измеряемая запросчиком (радиодальномером) дальность

$$D = c(t_3 + t_o + t_{\text{форм}}). \quad (10)$$

Если $t_3 = t_o = t_{\text{распр}}$, а $t_{\text{форм}}$ стремится к нулю, то измеряемая дальность

$$D = \frac{c t_{\text{распр}}}{2}. \quad (11)$$

В качестве ответного сигнала может быть использован сигнал, отраженный от объекта. Это явление используется, например, при измерении дальности РЛС или высоты полета самолетным радиовысотомером.

Методы измерения дальности, используемые в разных видах РНС:

- импульсный метод;
- частотный метод;
- фазовый метод.

В свою очередь перечисленные методы дальнометрии используются в следующих видах дальномерных систем:

- радиодальномерные системы без ответчика;
- радиодальномерные системы с ответчиком (импульсные);
- радиовысотомеры (импульсные и частотные);
- радиодальномерные геодезические (фазовые и импульсные).

2.3. Порядок выполнения расчетно-практического задания

а) В соответствии с индивидуальным заданием произвести расчет погрешностей измерения местоположения объекта при дальномерном методе построения радионавигационной системы, произвести расчет и построение рабочих зон дальномерной РНС

б) Расчет произвести для нескольких значений в заданных диапазонах дальностей от объекта до базовых станций РНС.

в) Результаты расчета представить в виде таблиц и графиков изменения погрешностей измерения местоположения объекта и изобразить схему расположения точек в пространстве, соответствующих рассчитанным значениям погрешностей.

г) Проанализировать полученные результаты и сделать подробные выводы.

Таблица 3 – Таблица исходных данных для выполнения задания № 2

Номер варианта	Расстояние между базовыми станциями	Погрешности измерения НП	Диапазон расстояний от объекта до базовых станций
1	$d = 47$ км	$\sigma_{DB} = 90$ м $\sigma_{DA} = 110$ м	$D_A = 30 \dots 150$ км $D_B = 30 \dots 150$ км
2	$d = 52$ км	$\sigma_{DB} = 100$ м $\sigma_{DA} = 120$ м	$D_A = 40 \dots 120$ км $D_B = 40 \dots 120$ км
3	$d = 60$ км	$\sigma_{DB} = 150$ м $\sigma_{DA} = 170$ м	$D_A = 50 \dots 100$ км $D_B = 50 \dots 100$ км
4	$d = 70$ км	$\sigma_{DB} = 160$ м $\sigma_{DA} = 180$ м	$D_A = 20 \dots 140$ км $D_B = 20 \dots 140$ км
5	$d = 80$ км	$\sigma_{DB} = 200$ м $\sigma_{DA} = 220$ м	$D_A = 80 \dots 200$ км $D_B = 80 \dots 200$ км
6	$d = 86$ км	$\sigma_{DB} = 180$ м $\sigma_{DA} = 160$ м	$D_A = 10 \dots 150$ км $D_B = 10 \dots 150$ км
7	$d = 90$ км	$\sigma_{DB} = 200$ м $\sigma_{DA} = 180$ м	$D_A = 90 \dots 220$ км $D_B = 90 \dots 220$ км
8	$d = 100$ км	$\sigma_{DB} = 250$ м $\sigma_{DA} = 220$ м	$D_A = 100 \dots 250$ км $D_B = 100 \dots 250$ км
9	$d = 110$ км	$\sigma_{DB} = 280$ м $\sigma_{DA} = 300$ м	$D_A = 100 \dots 300$ км $D_B = 100 \dots 300$ км
10	$d = 120$ км	$\sigma_{DB} = 300$ м $\sigma_{DA} = 350$ м	$D_A = 120 \dots 350$ км $D_B = 120 \dots 350$ км

2.4. Контрольные вопросы

1. Рабочая зона дальномерной РНС и погрешность измерения координат дальномерным методом.

2. Радиодальномерные системы с активным ответом. Принцип работы, достоинства и недостатки.

3. Радиодальномерные системы без ответчика. Принцип работы, достоинства и недостатки.

4. Импульсный метод измерения дальности до объектов. Выбор периода повторения импульсов и их длительности в импульсном методе.

5. Международная дальномерная система ближней навигации DME и система РСБН. ТТХ и принцип работы.

6. Уравнение дальности радиолокации для свободного пространства.

7. Влияние поглощения, переотражения от подстилающей поверхности и слоистых образований на дальность действия РТС.

8. Что такое поверхность положения. Вид поверхности положения для дальномерных систем.

Расчётно-практическое задание № 3 РАСЧЕТ РАБОЧИХ ЗОН И ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В УГЛОМЕРНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ РН СИСТЕМАХ

3.1. Основные теоретические сведения

Этот метод основан на измерении двух навигационных параметров:

- углового положения α_A объекта M относительно опорной станции A ;
- расстояния D от объекта M до опорной станции A .

При реализации угломерно-дальномерного метода измерение координат объекта, как правило, производятся без разнесения в пространстве нескольких базовых станций. Для этого из одной точки пространства A осуществляется измерение дальности (семейство линий положения – окружности) и измерение угловых координат (семейство линий положения – прямые линии).

3.2. Методические рекомендации по выполнению расчётно-практического задания

Пояснения оценки погрешности определения местоположения объекта угломерно-дальномерным позиционным методом приведены на рис. 10.

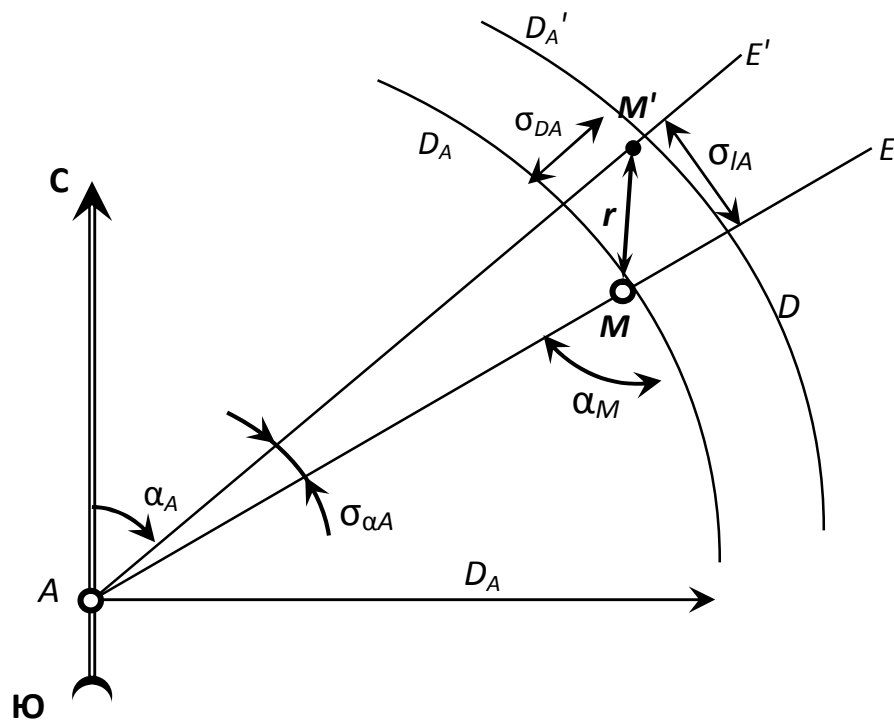


Рис. 10 – Оценка погрешности определения местоположения объекта
угломерно-дальномерным позиционным методом

При измерении с одной базовой станцией угол пересечения угломерных и дальномерных линий положения равен 90° и выражение для среднеквадратической ошибки (7) определения местоположения для угломерно-дальномерных систем приобретает вид

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_{DA}^2 + [D_A \sigma_{\alpha A}]^2}, \quad (12)$$

где σ_{DA} – среднеквадратические ошибки измерения дальности;

$\sigma_{\alpha A}$ – среднеквадратические ошибки измерения азимута (в радианах);

D_A – дальность до базовой станции.

3.3. Порядок выполнения расчетно-практического задания

а) В соответствии с индивидуальным заданием произвести расчет погрешностей измерения местоположения объекта при угломерно-дальномерном методе построения радионавигационной системы, произвести расчет и построение рабочих зон угломерно-дальномерной РНС.

б) Расчет произвести для нескольких значений в заданных диапазонах дальностей от объекта до базовых станций РНС.

в) Результаты расчета представить в виде таблиц и графиков изменения погрешностей измерения местоположения объекта и изобразить схему расположения точек в пространстве, соответствующих рассчитанным значениям погрешностей.

г) Проанализировать полученные результаты и сделать подробные выводы.

Таблица 4 — Таблица исходных данных для выполнения задания № 3

Номер варианта	Расстояние между базовыми станциями	Погрешности измерения НП	Диапазон расстояний от объекта до базовых станций
1	2	3	4
1	-	$\sigma_{\alpha A} = 1,0^\circ$ $\sigma_{DA} = 60$ м	$D_A = 10 \dots 45$ км
2	-	$\sigma_{\alpha A} = 1,2^\circ$ $\sigma_{DA} = 70$ м	$D_A = 10 \dots 50$ км
3	-	$\sigma_{\alpha A} = 1,1^\circ$ $\sigma_{DA} = 65$ м	$D_A = 10 \dots 40$ км
4	-	$\sigma_{\alpha A} = 1,3^\circ$ $\sigma_{DA} = 80$ м	$D_A = 10 \dots 60$ км
5	-	$\sigma_{\alpha A} = 1,4^\circ$ $\sigma_{DA} = 85$ м	$D_A = 10 \dots 55$ км
6	-	$\sigma_{\alpha A} = 1,9^\circ$ $\sigma_{DA} = 130$ м	$D_A = 10 \dots 65$ км
7	-	$\sigma_{\alpha A} = 1,5^\circ$ $\sigma_{DA} = 95$ м	$D_A = 10 \dots 60$ км

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
8	-	$\sigma_{\alpha A} = 1,8^\circ$ $\sigma_{DA} = 120 \text{ м}$	$D_A = 10 \dots 45 \text{ км}$
9	-	$\sigma_{\alpha A} = 1,6^\circ$ $\sigma_{DA} = 100 \text{ м}$	$D_A = 10 \dots 50 \text{ км}$
10	-	$\sigma_{\alpha A} = 1,7^\circ$ $\sigma_{DA} = 110 \text{ м}$	$D_A = 10 \dots 70 \text{ км}$

3.4. Контрольные вопросы

1. На чем основан метод определения местоположения объектов при угломерно-дальномерном способе построения РНС?

2. Что собой представляют линии положения при угломерно-дальномерном методе мостоопределения объектов?

3. Виды угломерно-дальномерных РНС.

4. Упрощённая структурная схема угломерно-дальномерной РНС типа РСБН.

5. От каких факторов зависит дальность обнаружения объектов при помощи РЛС?

6. Для чего предназначены радиолокационные маяки?

7. Как определяется максимальная дальность $D_{\text{МАКС}}$ обнаружения пассивных объектов радиолокационной станцией (РЛС) в пределах прямой видимости (без учета поглощения в атмосфере, осадках, отражений от подстилающей поверхности и т.д.)?

8. Чему равна ЭПР уголкового отражателя с треугольными гранями и квадратными гранями? Достоинства и недостатки?

9. Максимальная дальность действия канала запроса РЛС-РЛО и максимальная дальность канала ответа.

10. Чем ограничивается минимальная и максимальная дальность действия РЛС?

Расчётно-практическое задание № 4
РАСЧЕТ РАБОЧИХ ЗОН И ПОГРЕШНОСТЕЙ
МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
В РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ РН СИСТЕМАХ

4.1. Основные теоретические сведения

Определение местоположения в разностно-дальномерной системе основано на измерении разности дальностей $\Delta D = (D_A - D_B)$ до базовых станций A и B . Семейство линий положения при этом имеет форму гипербол. Каждая из гипербол характеризуется постоянным значением разности расстояний ΔD от точки M до фокусов гиперболы A и B , в которых располагаются базовые станции (рис. 11). Эту разность расстояний пользователь в точке M измеряет по временному запаздыванию сигналов синхронно излучаемых базовыми станциями A и B .

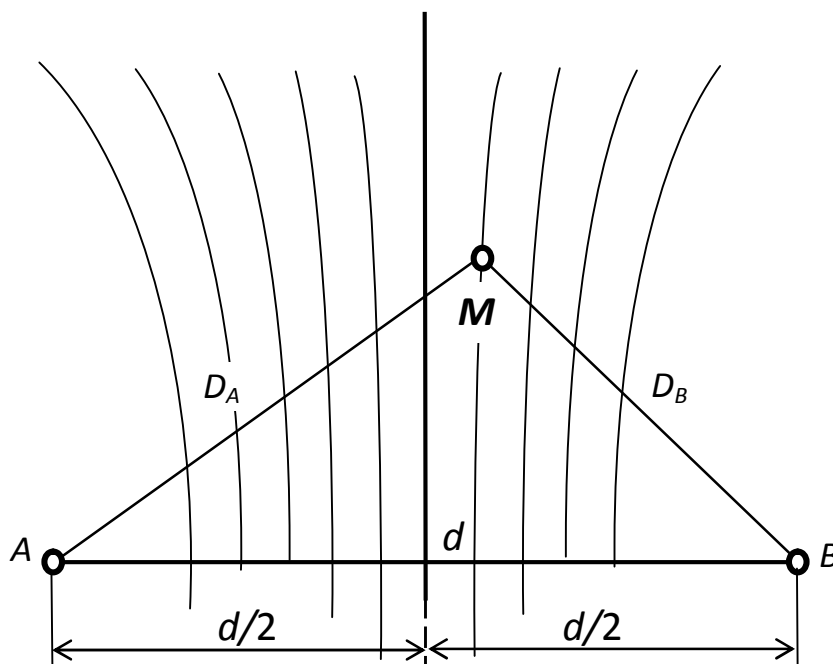


Рис. 11 – Линии положения в разностно-дальномерной системе

Для определения местоположения объекта M необходима еще одна базовая станция C . При этом формируется еще одно новое семейство линий положения и по взаимному пересечению гипербол могут быть однозначно определены координаты объекта M (рис. 12).

Ошибка определения местоположения объекта в разностно-дальномерной системе зависит не только от погрешности измерения временного запаздывания, но и от местоположения объекта относительно размещенных базовых станций системы.

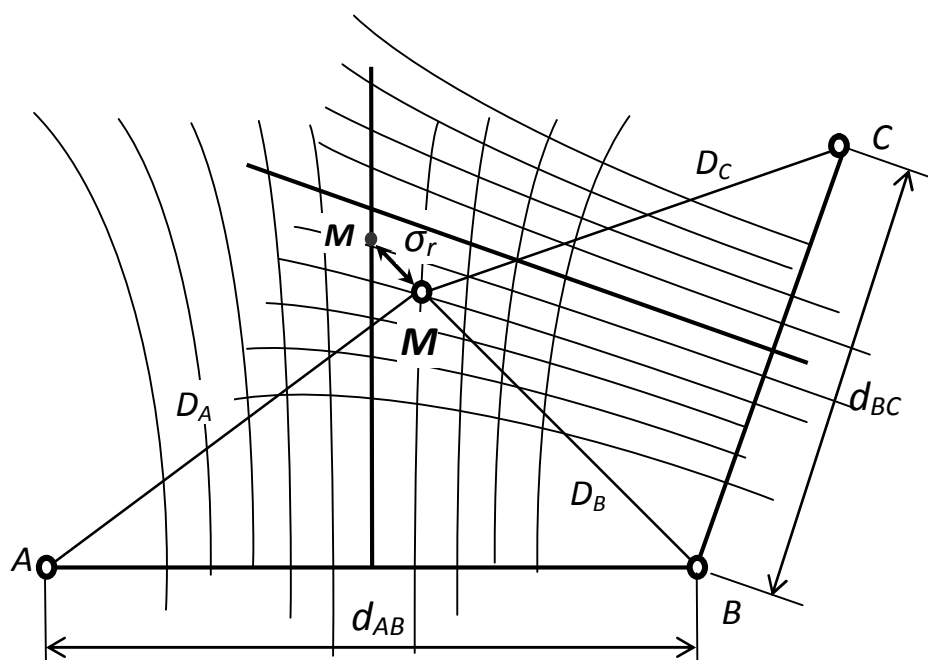


Рис. 12 – Оценка погрешности определения местоположения объекта разностно-дальномерным позиционным методом

4.2. Методические рекомендации по выполнению расчетно-практического задания

Среднеквадратическая погрешность измерения местоположения объекта разностно-дальномерным методом составляет

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{\Delta D}}{2 \sin\left(\frac{\alpha_{AB}}{2} + \frac{\alpha_{BC}}{2}\right)} \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \frac{\alpha_{AB}}{2}} + \frac{1}{\sin^2 \frac{\alpha_{BC}}{2}}}, \quad (13)$$

где $\sigma_{\Delta D}$ – ошибка определения разности расстояний ΔD ;

α_{AB} и α_{BC} – углы, под которыми из точки M видны базовые станции (рис. 13). Значения этих углов могут быть определены по теореме косинусов.

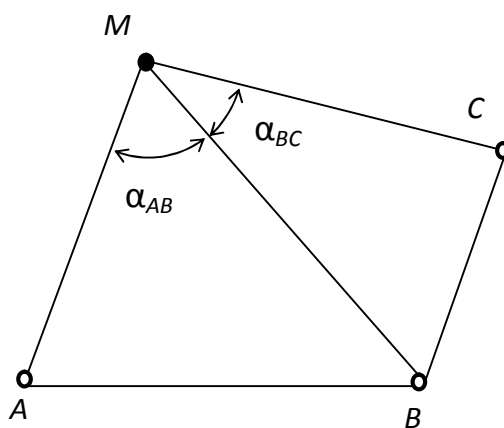


Рис. 13 – К расчету погрешности местоопределения

Разность времени прихода в точку М сигналов станций А и В составит:

$$\Delta t = t_{ABM} - t_{AM} = \frac{D_{BM} - D_{AM}}{c} + \left(\frac{D_{AB}}{c} + \tau_B \right). \quad (14)$$

Так как сумма $\left(\frac{D_{AB}}{c} + \tau_B \right)$ постоянна и не зависит от положения точки М, временное запаздывание Δt определяется разностью $\frac{\Delta D}{c} = \frac{D_{BM} - D_{AM}}{c}$.

Каждой линии положения соответствует свое значение Δt . Линии положения наносятся на географическую карту типографским способом. Оцифровка линий производится в микросекундах. Интервалы между линиями выбираются порядка десятков микросекунд (в зависимости от масштаба используемых карт).

Для определения второй линии положения необходимо иметь еще одну пару наземных станций, либо установить вторую ведомую станцию F (рис. 14).

Постоянная задержка в цепях ведомых станций А, В и F выбирается так, чтобы последовательность прихода сигналов станций А, В и F была вполне определенной.

При определении местоположения объектов, движущихся с большой скоростью, целесообразно использовать системы с одной ведущей и двумя и более ведомыми станциями, т. к. при независимой работе баз (две или несколько отдельных пар наземных станций) необходимо поочередно настраиваться на работу различных пар, что занимает время и может привести к большим ошибкам в определении местоположения.

Ошибка определения местоположения разностно-дальномерной системой зависит как от местоположения объекта, так и от относительного размещения наземных станций системы. Радиус среднеквадратического круга рассеяния

$$\sigma(r) = \frac{\sigma(\Delta D)}{2 \sin\left(\frac{\alpha_{AB}}{2} + \frac{\alpha_{AF}}{2}\right)} \sqrt{\frac{1}{\sin^2 \frac{\alpha_{AB}}{2}} + \frac{1}{\sin^2 \frac{\alpha_{AF}}{2}}}, \quad (15)$$

где $\sigma(\Delta D)$ – ошибка определения разности расстояний;

α_{AB} и α_{AF} – углы, под которыми из точки М видны базы системы.

На рис. 15 показаны контуры рабочих зон разностно-дальномерной радионавигационной системы, состоящих из четырех наземных станций.

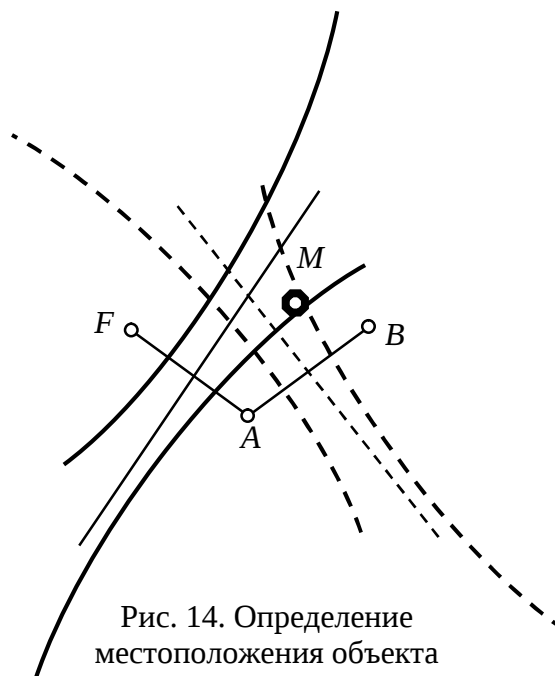


Рис. 14. Определение местоположения объекта по двум линиям положения

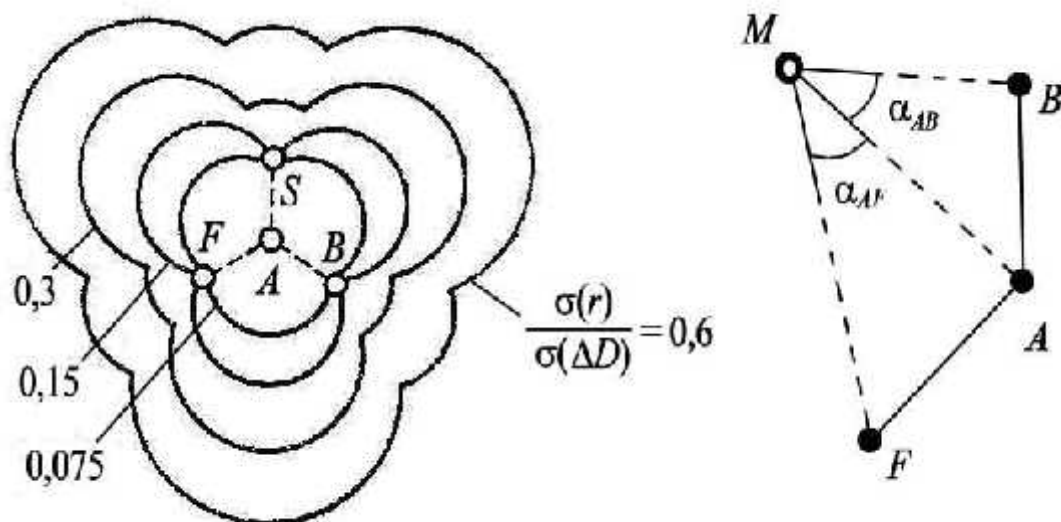


Рис. 15. Рабочие зоны разностно-дальномерных систем

4.3. Порядок выполнения расчетно-практического задания

а) В соответствии с индивидуальным заданием произвести расчет погрешностей измерения местоположения объекта при угломерно-дальномерном методе построения радионавигационной системы, произвести расчет и построение рабочих зон угломерно-дальномерной РНС.

б) Расчет произвести для нескольких значений в заданных диапазонах дальностей от объекта до базовых станций РНС.

в) Результаты расчета представить в виде таблиц и графиков изменения погрешностей измерения местоположения объекта и изобразить схему расположения точек в пространстве, соответствующих рассчитанным значениям погрешностей.

г) Проанализировать полученные результаты и сделать подробные выводы.

Таблица 5 — Таблица исходных данных для выполнения задания № 4

Номер варианта	Расстояние между базовыми станциями	Погрешности измерения НП	Диапазон расстояний от объекта до базовых станций
1	$d_{AB} = 150$ км $d_{BC} = 100$ км	$\sigma_{\Delta D} = 100$ м	$D_A = 100 \dots 500$ км $D_B = 100 \dots 500$ км $D_C = 100$ км
2	$d_{AB} = 160$ км $d_{BC} = 110$ км	$\sigma_{\Delta D} = 110$ м	$D_A = 150 \dots 600$ км $D_B = 150 \dots 600$ км $D_C = 150$ км
3	$d_{AB} = 165$ км $d_{BC} = 115$ км	$\sigma_{\Delta D} = 130$ м	$D_A = 200 \dots 600$ км $D_B = 200 \dots 600$ км $D_C = 200$ км

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4
4	$d_{AB} = 100 \text{ км}$ $d_{BC} = 80 \text{ км}$	$\sigma_{\Delta D} = 120 \text{ м}$	$D_A = 100 \dots 800 \text{ км}$ $D_B = 100 \dots 800 \text{ км}$ $D_C = 0 \text{ км}$
5	$d_{AB} = 150 \text{ км}$ $d_{BC} = 90 \text{ км}$	$\sigma_{\Delta D} = 150 \text{ м}$	$D_A = 200 \dots 800 \text{ км}$ $D_B = 200 \dots 800 \text{ км}$ $D_C = 150 \text{ км}$
6	$d_{AB} = 170 \text{ км}$ $d_{BC} = 110 \text{ км}$	$\sigma_{\Delta D} = 250 \text{ м}$	$D_A = 200 \dots 500 \text{ км}$ $D_B = 200 \dots 500 \text{ км}$ $D_C = 200 \text{ км}$
7	$d_{AB} = 160 \text{ км}$ $d_{BC} = 100 \text{ км}$	$\sigma_{\Delta D} = 180 \text{ м}$	$D_A = 150 \dots 700 \text{ км}$ $D_B = 150 \dots 700 \text{ км}$ $D_C = 150 \text{ км}$
8	$d_{AB} = 180 \text{ км}$ $d_{BC} = 100 \text{ км}$	$\sigma_{\Delta D} = 200 \text{ м}$	$D_A = 100 \dots 700 \text{ км}$ $D_B = 100 \dots 700 \text{ км}$ $D_C = 100 \text{ км}$
9	$d_{AB} = 140 \text{ км}$ $d_{BC} = 95 \text{ км}$	$\sigma_{\Delta D} = 140 \text{ м}$	$D_A = 250 \dots 900 \text{ км}$ $D_B = 250 \dots 900 \text{ км}$ $D_C = 250 \text{ км}$
10	$d_{AB} = 190 \text{ км}$ $d_{BC} = 100 \text{ км}$	$\sigma_{\Delta D} = 230 \text{ м}$	$D_A = 300 \dots 700 \text{ км}$ $D_B = 300 \dots 700 \text{ км}$ $D_C = 300 \text{ км}$

4.4. Контрольные вопросы

1. От чего зависит ошибка определения местоположения разностно-дальномерной системой?

2. Чему равен радиус среднеквадратического круга рассеяния при разностно-дальномерном методе определения местоположения объекта?

3. Из каких соображений выбирается постоянная задержка в цепях ведомых станций в разностно-дальномерной системе построения РНС?

4. В зависимости от чего выбираются интервалы между линиями положения наносимыми на карту? В каких единицах осуществляется оцифровка линий?

5. Назовите виды разностно-дальномерных РНС. Их достоинства и недостатки.

6. Что понимается под целостностью (достоверностью) РНС, доступностью РНС.

Расчётно-практическое задание № 5

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ РЛ С ПАССИВНЫМ ОТВЕТЧИКОМ

5.1. Основные теоретические сведения

В радиодальномерных навигационных системах без ответчика измеряется время распространения сигнала, излучаемого наземной станцией, до воздушного судна (ВС), на борту которого установлено бортовое приемное устройство. Обобщенная структурная схема радионавигационного дальномера (РНД) без ответчика представлена на рис. 16.

В составе передатчика наземной станции и бортового приемника имеются высокостабильные эталонные генераторы, которые перед вылетом синхронизируются между собой специальным сигналом синхронизации, излучаемым наземной станцией.

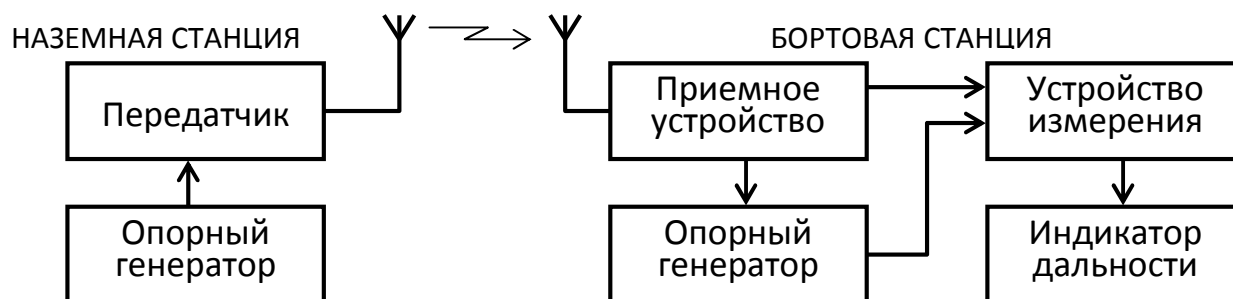


Рис. 16 – Структурная схема РНД без ответчика

По принятому сигналу на борту ВС измеряются или интервал времени Δt между опорным импульсом и импульсом на выходе приёмника (при импульсном характере излучения наземной станции), или разность фаз $\Delta \varphi$ между напряжением бортового опорного генератора и выходным напряжением приемника ВС (при непрерывном или квазинепрерывном излучении наземной станции).

Необходимость обеспечения высокой стабильности частоты эталонных генераторов является основным недостатком РНД без ответчика. Достоинства таких РНД состоят в следующем:

- бортовое оборудование не работает на излучение, благодаря чему достигается высокая скрытность;
- неограниченная пропускная способность системы;
- сравнительно большая дальность действия, поскольку мощность наземной станции может быть выбрана достаточно большой.

Успехи, достигнутые к настоящему времени в создании молекулярных квантовых генераторов, делают РНД без ответчика весьма перспективными. Особый интерес такой вид РНС представляет для управления беспилотными ЛА, запускаемых с площадок, оборудованных базовыми станциями.

5.2. Методические рекомендации по выполнению расчётного задания

Измеряемая дальность определяется соответственно выражениями:

$$D = \Delta t c \quad \text{или} \quad D = \frac{c \Delta \varphi}{2\pi f_{\text{сравн}}} = \frac{\lambda_{\text{сравн}} \Delta \varphi}{2\pi}, \quad (16)$$

где c – скорость распространения радиоволн;
 $f_{\text{сравн}}$ – частота сравнения, на которой осуществляется измерение разности фаз.

Как следует из выражений (16), погрешность измерения дальности равна

$$\sigma(D) = \sigma(t) c \quad \text{или} \quad \sigma(D) = \frac{\lambda_{\text{сравн}} \sigma(\varphi)}{2\pi}.$$

Величины ошибок $\sigma(t)$ или $\sigma(\varphi)$ в основном зависят от нестабильности частоты опорного генератора и времени полета:

$$\sigma(D) = c \frac{df_0}{f_0} t_{\text{ПОЛЕТА}} + dt_{\text{ДОП}},$$

где df_0 / f_0 – относительная нестабильность несущей частоты опорного генератора;

$t_{\text{ПОЛЕТА}}$ – время полета;

$dt_{\text{ДОП}}$ – дополнительная ошибка измерения, обусловленная нестабильностью скорости распространения радиоволн, неточностью синхронизации бортового генератора, действием помех и рядом других факторов.

5.3. Порядок выполнения расчётного-практического задания

а) В соответствии с индивидуальным заданием произвести расчет погрешностей измерения дальности до объекта для нескольких значений $t_{\text{полёта}}$ без учёта дополнительной ошибки измерения, обусловленной нестабильностью распространения радиоволн, неточностью синхронизации бортового генератора и действием помех.

б) Определить значения относительной нестабильности несущей частоты опорного генератора для фиксированного значения времени полета, при которых ошибка измерения дальности будет максимально допустимой.

в) Результаты расчета представить в виде таблиц и графиков изменения погрешностей измерения дальности.

г) Проанализировать полученные результаты и сделать подробные выводы.

Таблица 6 — Таблица исходных данных для выполнения задания № 5

№ п/п	Время полёта (час)	Время полёта фиксированное (час)	Относительная нестабильность несущей частоты ($\times 10^{-8}$)	Макс. допустимая погрешность измерения дальности (км)
1	0 – 2,5	2,5	1,0	1,0
2	2,5 – 5,0	5,0	0,9	1,2
3	5,0 – 7,5	7,5	0,8	1,4
4	7,5 – 10	10	0,7	1,6
5	1,0 – 3,0	3,0	0,6	1,8
6	3,0 – 6,0	6,0	0,5	2,0
7	4,0 – 8,0	8,0	0,4	2,2
8	2,0 – 4,0	4,0	0,3	2,4
9	3,5 – 7,0	7,0	0,2	2,6
10	7,0 – 9,0	9,0	0,1	2,8

5.4. Контрольные вопросы

1. Какие методы измерения дальности используются в радиодальномерных системах без ответчика?
2. Нарисовать обобщенную структурную схему РНД без ответчика.
3. Достоинства и недостатки РНД без ответчика.
4. Какие виды периодической модуляции несущей частоты используются в частотных дальномерах. Изобразить графически.
5. В каком диапазоне несущих частот работают фазовые дальномеры без ответчика?
6. В каком диапазоне частот работают импульсные радиовысотомеры?
7. Изобразить функциональную схему импульсного радиовысотомера РВ-21(А-035).
8. В каких режимах может работать импульсный радиовысотомер. Дать пояснения всех режимов работы.
9. Изобразить эпюры напряжений, поясняющие принцип работы РВ-21.
10. Чем ограничивается минимальная высота в импульсных РВ.
11. Чем ограничивается максимальная высота импульсных РВ

Расчётно-практическое задание № 6

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ РЛ С АКТИВНЫМ ОТВЕТЧИКОМ

6.1. Основные теоретические сведения

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

$$D_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{и.рлс}} G_{\text{рлс}}^2 \sigma_{\text{эфф}} \lambda^2}{64\pi^3 P_{\text{пр.мин.рлс}}}}$$

где $P_{\text{и.рлс}}$ – импульсная мощность передатчика РЛС;

$G_{\text{рлс}}$ – коэффициент усиления приёмопередающей антенны РЛС;

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

λ – рабочая длина волны РЛС;

$P_{\text{пр.мин.рлс}}$ – минимальная мощность сигнала на входе приёмника РЛС, достаточная для обнаружения объекта.

Поскольку реальные объекты имеют различную ЭПР, то и дальность их обнаружения может значительно отличаться. В таблице 7 приведены средние значения ЭПР различных объектов.

Таблица 7 – Среднее значение ЭПР различных объектов

Объект	Средняя ЭПР (м ²)
Транспортное судно большого тоннажа, более 10тыс.тонн	(10...15)×10 ³
Транспортное судно среднего тоннажа, 1.....10тыс.тонн	(3...10)×10 ³
Транспортное судно малого тоннажа, 50....200тонн	50....250
Средний бомбардировщик	5...30
Тяжёлый истребитель	5...10
Танк	6...9
Легкий истребитель	2...5
Рубка подводной лодки	1
Крылатая ракета	(1...10)×10 ⁻²
Боеголовка баллистической ракеты	(1...10)×10 ⁻³
Спасательный мотобот	7...20
Шлюпка, спасательный плот	1....3
Человек(λ=3см)	1,2-0,5
Голубь(λ=3см)	10 ⁻² ...10 ⁻³

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

ЭПР можно увеличить с помощью уголковых отражателей (рис. 17).

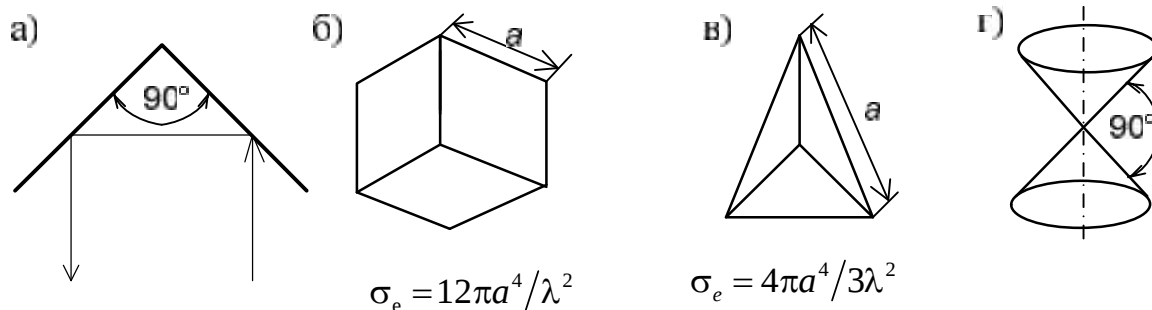


Рис. 17 – Принцип действия (а), уголковые отражатели с квадратными (б) и треугольными (в) гранями; биконический отражатель (г)

Для ЭПР уголкового отражателя с квадратными гранями размером a имеется соотношение

$$\sigma_e = 12\pi a^4 / \lambda^2.$$

Для уголкового отражателя с треугольными гранями

$$\sigma_e = 4\pi a^4 / 3\lambda^2.$$

Из приведенных соотношений видно, что уголковый отражатель с треугольными гранями при прочих равных условиях дает в девять раз меньшее значение по сравнению с уголковым отражателем с квадратными гранями, но имеет более жесткую конструкцию, поэтому чаще применяется.

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

6.2. Методические рекомендации по выполнению расчётного задания

В радионавигационных системах с ответчиком имеются два радиоканала: запроса и ответа. Стабильный опорный генератор входит в состав только бортовой станции, называемой запросчиком. Станция, которая излучает ответные импульсы, называется ответчиком. Ответчик может устанавливаться как на земле, так и на ВС.

На борту ВС измеряется суммарное время распространения радиосигналов от запросчика к ответчику и обратно: $\Delta t = 2D/c$.

При этом в отличие от РНД без ответчика в РНД с ответчиком ошибка измерения дальности в основном определяется нестабильностью опорного генератора и не зависит от времени полета.

Дальность обнаружения объектов в 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 системы РЛС-РЛО, на который запросные сигналы от РЛС ещё имеют достаточную мощность для запуска аппаратуры ответчика, может быть найдена из уравнения дальности радиосвязи для свободного пространства:

$$D_{\text{запр}} = \sqrt{\frac{P_{\text{и.рлс}} G_{\text{рлс}} G_{\text{рло}} \lambda^2}{16 \pi^2 P_{\text{пр.мин.рло}}}}$$

где $G_{\text{рло}}$ – коэффициент усиления антенны ответчика; системы РЛО-РЛС;

$P_{\text{пр.мин.рло}}$ – минимальная мощность сигнала РЛС на входе приемника РЛО, достаточная для нормальной работы приёмной аппаратуры РЛО.

Максимальная дальность действия канала ответа системы РЛО – РЛС, на которой ответные сигналы РЛО ещё имеют мощность, достаточную для наблюдения их на индикаторе РЛС, может быть найдена из аналогичного соотношения

$$D_{\text{отв}} = \sqrt{\frac{P_{\text{и.рло}} G_{\text{рло}} G_{\text{рлс}} \lambda^2}{16 \pi^2 P_{\text{пр.мин.рлс}}}},$$

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

В авиационной навигации наибольшее применение находит импульсный метод измерения расстояний, когда бортовая самолетная станция посылает запросные сигналы и измеряет время запаздывания ответных сигналов, вырабатываемых наземными станциями. Координаты наземных станций точно известны. На карте местоположение самолета или корабля определяют как точку пересечения двух круговых линий положения.

Упрощённая структурная схема дальномерного канала с ответчиком представлена на рис. 18.

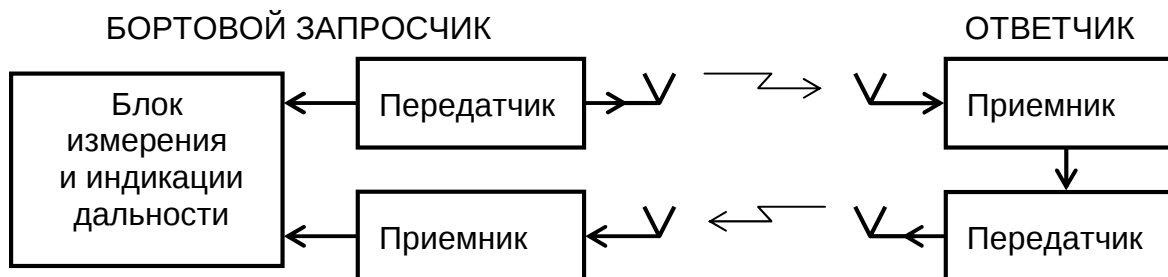


Рис. 18 – Структурная схема дальномерной системы с ответчиком

Каждый наземный ответчик работает на частоте только одного канала и может одновременно обслуживать до 100 летательных аппаратов.

Дальномерные системы пригодны и для вывода самолета (корабля) в расчетную точку с известными координатами. Местоположение искомой точки рассчитывают заранее, и параметры определяющих ее линий положения должны быть известны.

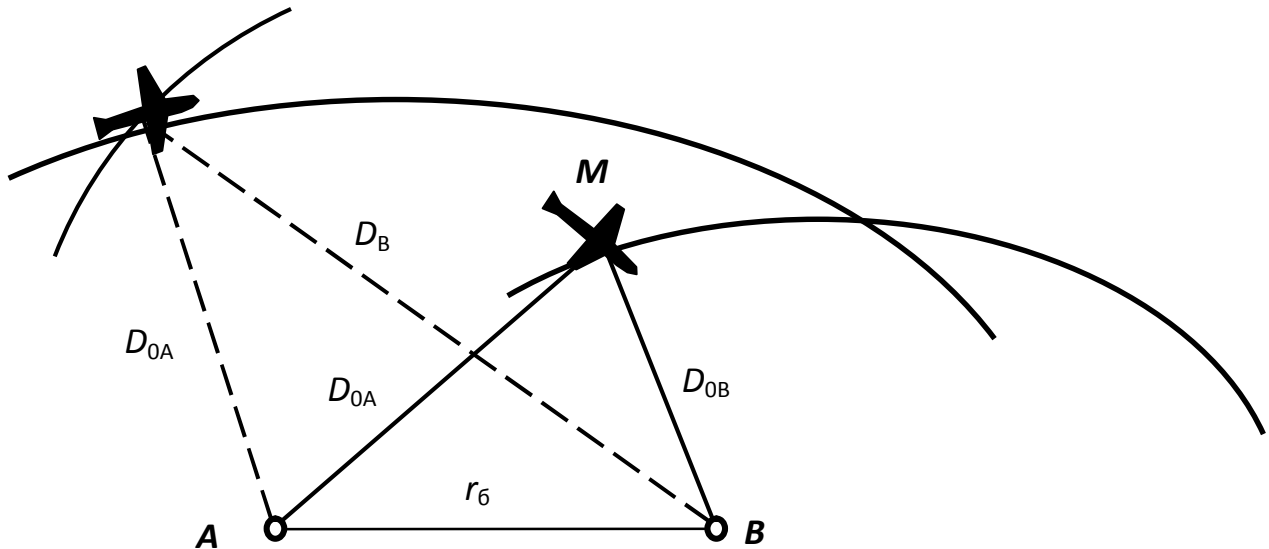


Рис. 19 – Схема определения местоположения в дальномерной системе DME

Для выхода в расчетную точку M (рис. 19) летательный аппарат движется по одной из линий положения (дуге окружности радиуса D_{0A}) относительно центра A , в котором расположена наземная станция-ответчик (станция A), называемая в этом случае станцией сноса. Расстояние до второй наземной станции B , которую называют станцией скорости, непрерывно изменяется. Результаты измерения этого расстояния до станции B используется для определения путевой скорости и момента выхода в расчетную точку.

6.3. Порядок выполнения расчётного-практического задания

а) Из приведённых в разделе 1 уравнений рассчитать зависимость мощности сигнала на входе приёмного устройства РЛС $P_{пр.рлс}$ от дальности D при обнаружении пассивных объектов, объектов, на которых установлены уголкового отражатели и объектов с РЛО.

б) В соответствии с индивидуальным заданием (таблица 8) рассчитать и построить графики зависимости мощности сигнала $P_{пр.рлс}$ в диапазоне дальностей от $D_{макс}$ до $D_{мин}$ при обнаружении объекта с заданной ЭПР $\sigma_{эфф}$ с установленным треугольным уголкового отражателем (длина ребра a) и с РЛО.

в) Объяснить полученные результаты и сделать подробные выводы.

Таблица 8 – Исходные данные для индивидуального расчётного задания

№ п/п	$\sigma_{\text{эфф.}}$ (м)	a (м ²)	$D_{\text{макс}}$ (км)	$D_{\text{мин}}$ (км)	$P_{\text{и..рлс}}$ (кВт)	$P_{\text{и..рло}}$ (Вт)	f (ГГц)	$G_{\text{рлс}}$ (раз)	$G_{\text{рло}}$ (раз)
1	1	0,25	25	5	4,5	0,40	9,2..9,5	700	6,0
2	3	0,30	30	3	5,0	0,45	9,2..9,5	750	6,2
3	2	0,40	35	1	5,5	0,35	9,2..9,5	800	6,5
4	4	0,45	40	2	6,0	0,50	9,2..9,5	850	6,8
5	1	0,35	45	4	6,5	0,40	9,2..9,5	900	7,0
6	2	0,40	50	6	7,0	0,35	9,2..9,5	950	7,5
7	3	0,30	55	3	7,5	0,45	9,2..9,5	1000	8,0
8	4	0,25	60	7	8,0	0,50	9,2..9,5	1100	8,2
9	2	0,45	65	2	8,5	0,40	9,2..9,5	1200	8,5
10	3	0,35	70	8	9,0	0,35	9,2..9,5	1250	9,0

6.4. Контрольные вопросы

1. Пояснить понятие – эффективная площадь рассеяния (ЭПР). Как рассчитывается ЭПР углового отражателя с треугольными и прямоугольными гранями?

2. В каком частотном диапазоне работают РЛО? Какая должна быть полоса пропускания приёмника РЛО и почему?

3. От чего зависит предельная дальность прямой видимости между РЛС и объектом с учётом затенения за счёт сферичности Земли?

4. Как в целом оценивается дальность действия системы с активным ответом?

5. Какие основные недостатки РНД с ответчиком?

6. Чем в основном определяется ошибка измерения дальности в РНД с ответчиком?

7. Основные технические параметры дальномера СД-75. Структурная схема канала дальности DME с дальномером СД-75.

8. Временные диаграммы работы дальномерной системы DME.

9. За счёт какого явления угловой отражатель обладает свойством отражения электромагнитной энергии практически без рассеяния?

10. Конструктивные особенности и технические характеристики РЛО «Муссон 502».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баженов А.В. Радионавигационные системы: учебное пособие / А. В. Баженов, Г. И. Захаренко, А. Н. Бережнов, К. Ю. Савченко ; под ред. А. В. Баженова. — Ставрополь: Изд СВВАИУ(ВИ) , 2007. — 202 с.
2. Бакулев, П. А Радионавигационные системы : учебное пособие / П. А. Бакулев, А. А. Сосновский. — М.: «Радиотехника», 2006. — 224 с.
3. Бакулев, П. А. Сборник задач по курсу «Радиолокационные системы» / Под ред. П. А. Бакулева и А. А. Сосновского. — М.: «Радиотехника», 2007. — 208 с.
4. Бакулев, П. А. Радиолокационные системы. учебник для вузов. Изд. 2е, перераб. и доп./ П. А. Бакулев. — М: «Радиотехника», 2007. — 376 с.
5. Бамбуркин А. П. Радиосветотехнические средства УВД и воздушной навигации. /А. П Бамбуркин, И. Е. Кудрясов, А. В. Хафизов. — М.: Воздушный транспорт, 1982. — 134 с.
6. Бамбуркин, А. П. Аэронавигационные радиотехнические системы. / А. П. Бамбуркин, В. Н. Неделько, М. И. Рубец. — Кировоград: Изд ГЛАУ, 2002. — 520 с.
7. Василенко, В. А. Радионавигационные приборы и системы: учеб. пособие. / В. А. Василенко, Б. С. Розен, В. В. Серегин. — М.: "Агропромиздат" 1986. — 319 с.
8. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Изд. 3-е, перераб. /Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. — М.: «Радиотехника», 2005. — 688 с.
9. Гряник, В. Н. Теория и техника радиолокации и радионавигации: учеб. пособие. / В. Н. Гряник, С. Н. Павликов. — Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2009. — 132 с.
10. Демиденко, П. П. Судовые радиолокационные и радионавигационные системы: учеб. пособие для вузов / П. П. Демиденко. — Одесса : Изд-во ОНМА, 2008. — 334 с.
11. Дмитриев В.И. Современные навигационные системы и безопасность судоходства./ В. И. Дмитриев, В. И. Форафонов. — Моркнига, 2010 — 160 с.: ил.
12. Ковалев, М. А Радиотехнические навигационные средства самолетовождения и посадки. В 2 ч.: учеб. пособие. / М. А. Ковалев, И. И. Хабло, А. Л. Золотарев, С. П. Велижанин, Д. С. Елуфимов. — Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. — 76 с.
13. Коптев, А. Н. Авиационное и радиоэлектронное оборудование воздушных судов гражданской авиации / А. Н. Коптев. — Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева, 2011. — 248 с.

14. Кучерявый А. А. Бортовые информационные системы: курс лекций /А. А. Кучерявый, под ред. В.А. Мишина и Г.И Ключева. 2-издание перераб.— Ульяновск: Изд.УлГТУ, 2004. — 504 с.
15. Лукьянчук, А. Г. Спутниковые системы связи, вещания и навигации: Учеб. пособие/ А. Г. Лукьянчук, Ю. П. Михайлюк, А. А. Савочкин; Под ред. А. Г. Лукьянчука. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2002. — 335 с.
16. Лукьянчук, А.Г. Работа в системах спутниковой радионавигации: учебное пособие / А. Г. Лукьянчук, Ю. П. Михайлюк. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. — 168 с.
17. Монаков, А. А Теоретические основы радионавигации : учебное пособие / А. А. Монаков.— СПб: СПбГУАП, 2002. — 70 с.
18. Незлин Д. В. Радиотехнические системы: учебное пособие./ Д. В. Незлин. — М.: МИЭТ, 2008. — 204 с.
19. Олянюк, П. В. Радионавигационные устройства и системы гражданской авиации / П. В. Олянюк, Г. П. Астафьев, В. В. Грачев. — М.: Транспорт, 1983. — 194 с.
20. Печенин В. В. Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов: учебное пособие / В. В. Печенин. — Харьков: Изд. ХАИ, 2002 — 124 с.
21. Старых, А. В. Радионавигационное оборудование воздушных судов. Учебное пособие по выполнению лабораторных работ / А. В. Старых. — М.: Изд МГТУГА, 2007. — 45 с.
22. Ширман, Я. Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория / Под ред. Я. Д. Ширмана — М: «Радиотехника», 2007. — 512 с.
23. Скрыпник, О. Н. Радионавигационные системы воздушных судов: Учебник / О. Н. Скрыпник. — М.: НИЦ Инфра-М, 2014. — 348 с.
24. Ширман, Я. Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория / Под ред. Я. Д. Ширмана. — М.: «Радиотехника», 2007. — 512 с.
25. Лукьянчук А.Г. Основы теории радионавигационных систем и комплексов. Локальные РНС: учебное пособие / А.Г. Лукьянчук, Ю.М. Поповнин. — Севастополь: СевГУ, 2017. — 134 с.

**Т Е О Р И Я
РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ
И КОМПЛЕКСОВ**

Учебно-методическое пособие

*Составитель : **Поляков** Александр Леонидович*

В авторской редакции

Изд. № 182/2022. Объем 2,25 п.л. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 2,205.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»