

## Глава 2. ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ И ТОЧНОСТЬ РНУ И РНС.

### 2.1. Дальность действия РНУ И РНС.

#### 2.1.1. Дальность действия РНУ в свободном пространстве.

Одна из основных задач при проектировании РНУ или РНС заключается в обеспечении такой мощности принимаемого сигнала  $P_2$ , при которой элементы  $W$ , характеризующие положение и движение объекта, измеряются с заданными точностью и вероятностью.

**Дальность действия позиционного пассивного РНУ.** В позиционных пассивных РНУ (см. рис. 1.11), определяющих навигационный элемент  $W$ , объект  $O$  связан с опорной станцией  $OC$  радиолинией, часто называемой навигационной. Плотность мощности сигнала на единицу поверхности на расстоянии  $R$  от передающей антенны РНУ в направлении максимума ее диаграммы направленности, т.е. отношение излучаемой мощности к площади сферы радиуса  $R$ , определяется соотношением

$$P = \frac{P_1 G_{a1} \eta_1}{4\pi R^2}, \quad (2.1)$$

где  $P_1$  – мощность передатчика;  $G_{a1}$  – коэффициент усиления передающей антенны в направлении максимума диаграммы направленности (по мощности);  $\eta_1$  – к.п.д. фидерной линии, связывающей передающую антенну с передатчиком (все параметры относятся к опорной станции).

Мощность сигнала на входе приёмника РНУ объекта  $O$ , расположенного в направлении максимума излучения:

$$P_2 = P S_{a2} \eta_2 \quad (2.2)$$

где  $S_{a2}$  – эффективная площадь приемной антенны;  $\eta_2$  – к.п.д. фидерной линии приемного тракта РНУ. Известно, что

$$S_a = \frac{G_a \lambda^2}{4\pi}, \quad (2.3)$$

где  $G_a$  – коэффициент усиления приемной антенны. Тогда соотношение (2.2) принимает вид

$$P_2 = \frac{P_1 G_{a1} G_{a2} \eta_1 \eta_2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2}. \quad (2.4)$$

Сигнал с мощностью  $P_2$  служит для определения навигационного элемента  $W$ . Учитывая, что при отсутствии внешних помех на выполняемые в РНУ измерения оказывает мешающее влияние внутренние шумы приемника, введем минимальное отношение мощностей сигнала и шума  $q_{\min} = P_2/P_{\text{ш}}$ , при котором флуктуационная СКП определения  $W$  ( $\sigma_w$ ) не будет превышать заданное значение\*<sup>1</sup>. Так как мощность шума, приведенная к входу приемника,

$$P_{\text{ш}} = N k T_0 \Delta F_{\text{ш}} \zeta, \quad (2.5)$$

где  $N$  – коэффициент шума приемника;  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/(Гц град) – постоянная Больцмана;  $T_0$  – стандартная температура при определении коэффициента шума ( $T_0 = 290$  К);  $\Delta F_{\text{ш}}$  – эффективная ширина спектра шума приемного тракта, определяемая полосой пропускания линейной части приемника, предшествующей измерителю информативного параметра сигнала;  $\zeta$  – коэффициент потерь, показывающий во сколько раз уменьшается отношение мощности сигнала к мощности шума из-за неоптимальности обработки. Используя (2.4) и (2.5), получаем соотношение, определяющее дальность действия рассматриваемого РНУ, т.е. то максимальное расстояние от опорной станции, на котором обеспечивается заданное значение  $\sigma_w$ , при работе в свободном пространстве:

$$R_{\max 0} = \sqrt{\frac{P_1 G_{a1} G_{a2} \eta_1 \eta_2 \lambda^2}{(4\pi)^2 q_{\min} P_{\text{ш}}}} \quad (2.6)$$

При радионавигационных измерениях обычно необходимо обеспечить прием сигналов опорной станции с любого направления. Для удовлетворения этого требования используют ненаправленные антенны, для которых  $G_{a1} \approx G_{a2} \approx 1$ . Поэтому

\*Заметим, что в РЛС вместо  $q_{\min}$  задаются значением порогового отношения сигнал/шум  $q_{\text{пор}}$ , характеризующего качество обнаружения сигнала.

$$R_{\max 0} = \sqrt{\frac{P_1 \eta_1 \eta_2 \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{\min}}} \quad (2.7)$$

С помощью (2.7) можно рассчитать минимальное значение мощности  $P_{\min}$  передатчика, при котором на требуемой дальности будет обеспечена заданная точность (аналог пороговой мощности  $P_{\text{пор}}$  в режиме обнаружения):

$$P_{\min} = P_{2\min} = q_{\min} P_{\text{ш}} = q_{\min} NkT_0 \Delta F_{\text{ш}} \zeta. \quad (2.8)$$

**Дальность действия активных РНУ с активным ответом.** В таких РНУ (см. рис.1.10) дальности действия запросчика и ответчика рассчитываются по формулам

$$R_{\max \text{от}} = \sqrt{\frac{P_{1з} G_{a1з} G_{a2\text{от}} \eta_{1з} \eta_{2\text{от}} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{\min \text{от}}}},$$

$$R_{\max з} = \sqrt{\frac{P_{1\text{от}} G_{a1\text{от}} G_{a2з} \eta_{1\text{от}} \eta_{2з} \lambda^2}{(4\pi)^2 P_{\min з}}},$$

где индексы «з» и «от» служат для обозначения параметров запросчика и ответчика соответственно.

При  $R > R_{\max \text{от}}$  сигнал не сможет быть принят ответчиком, а при  $R > R_{\max з}$  – запросчиком. Поэтому целесообразен вариант активной системы с активным ответом, у которой  $R_{\max з} = R_{\max \text{от}}$ , для чего необходимо обеспечить равенство

$$P_{1з} P_{\min з} \frac{G_{a1з} \eta_{1з}}{G_{a2з} \eta_{2з}} = P_{1\text{от}} P_{\min \text{от}} \frac{G_{a1\text{от}} \eta_{1\text{от}}}{G_{a2\text{от}} \eta_{2\text{от}}}.$$

В частном случае работы в импульсном режиме (одна антенна на ответчике и одна на запросчике)  $P_{1з} P_{\min з} = P_{1\text{от}} P_{\min \text{от}}$

**Дальность действия (максимальная рабочая высота) активных РНУ.** В рассматриваемых устройствах практический интерес представляет не  $R_{\max}$  а максимальная рабочая высота (высотность РНУ) над отражающей поверхностью  $H_{\max 0}$ , на которой обеспечивается заданная точность определения  $W$ :

$$H_{\max 0} = R_{\max 0} \sin \beta_0, \quad (2.9)$$

где  $\beta_0$  – угол визирования отражающей площадки ОП, соответствующий в данной ситуации углу наклона ДН антенны РНУ (рис. 2.1).

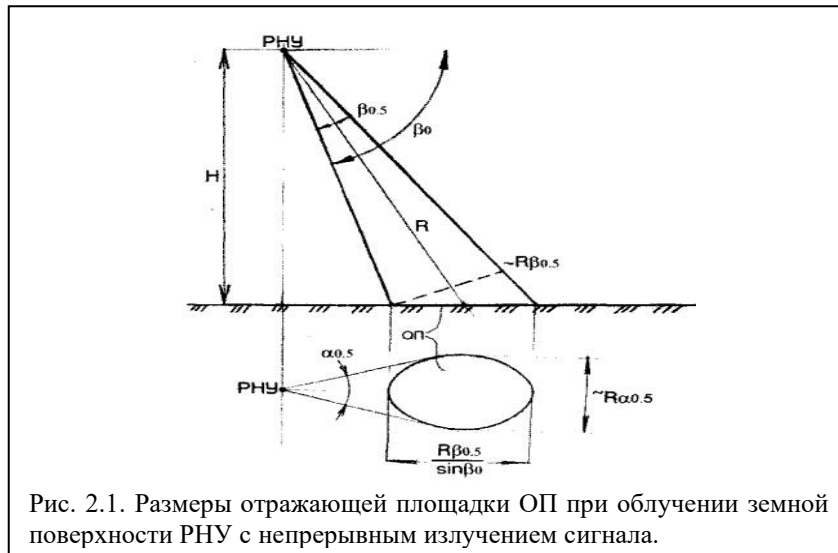


Рис. 2.1. Размеры отражающей площадки ОП при облучении земной поверхности РНУ с непрерывным излучением сигнала.

Воспользуемся соотношением для дальности действия активного РНУ:

$$R_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{P_1 S_a^2 \eta^2 S_0}{4\pi\lambda^2 P_{\min}}}, \quad (2.10)$$

где  $S_0$  – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели и учтено, что передающий и приемный антенно-фидерные тракты радиоустройства идентичны ( $S_{a1}=S_{a2}=S_a$  и  $\eta_1=\eta_2=\eta$ ).

Согласно рис. 2.1, отражающая площадка представляет собой поверхностно распределенную цель (при непрерывном излучении имеющая форму эллипса), ЭПР которой

$$S_0 = \frac{\pi R^2 \alpha_{0,5} \beta_{0,5}}{4 \sin \beta_0} S_{\text{уп}}(\beta_0), \quad (2.11)$$

где  $\alpha_{0,5}$  и  $\beta_{0,5}$  – ширина ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях;  $S_{\text{уп}}$  – удельная ЭПР с размерностью  $\text{м}^2/\text{м}^2$ , зависящая от угла  $\beta_0$  и от типа ОП.

В соотношении (2.11) принято, что  $\text{tg}\alpha_{0,5} \approx \alpha_{0,5}$  и  $\text{tg}\beta_{0,5} \approx \beta_{0,5}$ .

Используя приближенную формулу

$\alpha_{0,5} \beta_{0,5} \approx \lambda/S_a$  и соотношения (2.9) и (2.11), получаем

$$H_{\max 0} = \sqrt{\frac{P_1 S_a \eta^2 S_{\text{уп}}(\beta_0) \sin \beta_0}{16 P_{\min}}}. \quad (2.12)$$

### 2.1.2. Влияние условий распространения радиоволн на дальность действия и точность РНУ.

Радионавигационные средства наиболее широко применяются для определения координат и скорости объектов, находящихся в околоземном пространстве или на поверхности Земли. При этом используемые в РНУ радиоволны распространяются в пределах земной атмосферы, представляющей собой среду с переменными параметрами (давление, температура, влажность и др.). Эти параметры влияют на относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon'$  атмосферы, а следовательно и на коэффициент преломления  $n$  и скорость распространения радиоволн  $v = c/\sqrt{\epsilon'} = c/n$ , где  $c$  – скорость распространения радиоволн в вакууме.

При распространении радиоволн имеет место уменьшение энергии сигнала (затухание) не только в силу закона сферического рассеяния, когда принимаемая мощность  $P_2 \sim 1/R^2$  (см. раздел 2.1.1), но и из-за поглощения в среде, в которой или над которой распространяется волна. Степень поглощения энергии сигнала существенно зависит от длины волны  $\lambda$  этого сигнала.

В радионавигации используются сигналы, несущие частоты которых лежат в пределах от нескольких килогерц до нескольких гигагерц. В соответствии с длиной волны сигналов различают диапазоны радиоволн, перечень которых приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1.

Наименование диапазона радиоволн*	Граничные значения	
	Длин волн $\lambda_{\min} - \lambda_{\max}$ , м	Несущих частот $f_{\min} - f_{\max}$ , МГц
Мириаметровый (сверхдлинноволновый)	$10^4 - 10^5$	0,03 – 0,003
Километровый (длинноволновый)	$10^3 - 10^4$	0,3 – 0,03
Гектометровый (средневолновый)	100 – 1000	3 – 0,3
Декаметровый (коротковолновый)	10 – 100	30 – 3
Метровый (УКВ)**	1 – 10	300 – 30

Дециметровый (УКВ)**	0,1 – 1	3000 – 300
Сантиметровый (УКВ)**	0,01 – 0,1	$3 \cdot 10^4$ – $3 \cdot 10^3$
Миллиметровый(УКВ)**	0,001 – 0,01	$3 \cdot 10^5$ – $3 \cdot 10^4$

- В скобках указаны негостированные, но широко распространенные наименования.
- \*\* УКВ – ультракороткие волны. Диапазон УКВ широко используется в радиолокационных системах [4]

В приложении 1 приводится таблица радиочастот, отведенных и разрешенных для использования радионавигационными системами и устройствами Комиссией РФ по распределению частотного ресурса.

Радиоволны различных диапазонов существенно отличаются по характеру распространения друг от друга. В зависимости от вида траектории распространения (рис.2.2) различают четыре характерных типа радиоволн: тропосферные –1, поверхностные –2, пространственные –3 радиоволны и радиоволны волноводного типа –4.

В данной главе рассматриваются некоторые особенности радиоволн этих типов, оказывающие влияние на работу РНУ. Для детального ознакомления с этими особенностями следует обратиться к литературным источникам по теории распространения радиоволн.

**Тропосферные волны (ТВ).** Радиоволны этого типа характерны для диапазона УКВ. Это объясняется тем, что электромагнитные колебания с  $\lambda < 10$ м обычно не отражаются от ионосферы и не способны огибать сферическую поверхность земного шара.

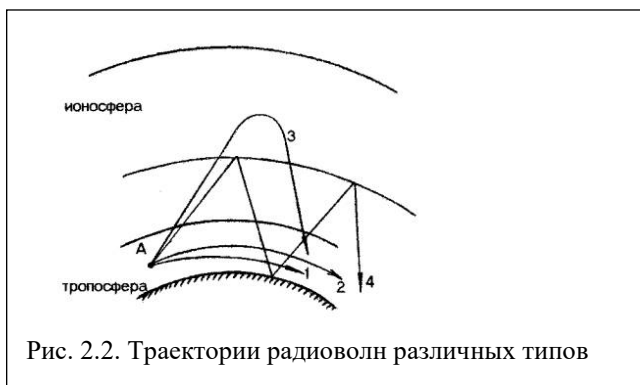


Рис. 2.2. Траектории радиоволн различных типов

Известно, что тропосфера, верхняя граница которой над поверхностью Земли находится на высоте около 15км, представляет собой неоднородную диэлектрическую среду с изменяющимся по высоте коэффициентом преломления  $n$ , состоящую в основном из воздуха и водяного пара. Изменение  $n$  ведет к искривлению траектории волны (рефракция), а наличие газов воздуха и пара вызывает поглощение энергии сигнала. Кроме этих факторов, на работу РНУ диапазона УКВ влияют сигналы, отраженные от земной поверхности, вызывающие искажения диаграмм направленности антенн РНУ.

Важно отметить достаточно высокое постоянство параметров тропосферы, что в ряде случаев позволяет учитывать их влияние на дальность действия и точность РНУ.

Рефракция ТВ зависит от градиента коэффициента преломления  $dn/dH$ . Для учета влияния рефракции реальную тропосферу заменяют ее моделью – стандартной ("нормальной") тропосферой (давление у поверхности Земли 760мм рт.ст., температура 15°C, влажность 60%). Высота стандартной тропосферы 11км. В пределах стандартной тропосферы градиент

коэффициента преломления постоянен и составляет  $\frac{dn}{dH} = -4 \cdot 10^{-8} \frac{1}{\text{м}}$ , что соответствует

положительной рефракции, когда радиус кривизны траектории волны  $R_{\text{тр}} > 0$  и траектория обращена выпуклостью вверх. Для стандартной тропосферы  $R_{\text{тр}} = 25000$ км. В результате рефракции примерно на 15% возрастает дальность прямой видимости, обусловленной сферической поверхностью Земли.

При постоянстве коэффициента преломления атмосферы т.е. при отсутствии рефракции радиоволны распространяются прямолинейно и дальность действия радиолинии ограничивается дальностью прямой видимости (рис. 2.3):

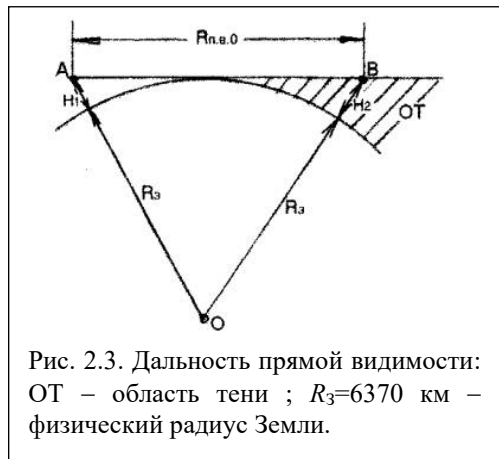
$$R_{\text{пво}} = 112,9(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2})$$

При учете рефракции радиоволн связь возможна на дальностях, больших  $R_{\text{пво}}$

$$R_{\text{пв}} = 130,3(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2})$$

В последних двух формулах  $H_1$  и  $H_2$  – высоты подъема передающей и приемной антенн над земной поверхностью (все величины выражены в километрах).

Рефракция приводит к погрешностям определения дальности  $R$  и угла места  $\beta$  (погрешность тропосферной рефракции), зависящим соответственно от длины участка траектории волны в тропосфере и угла места источника излучения или точки приема сигнала. Значения  $\Delta R$  могут достигать нескольких метров, а  $\Delta\beta$  – нескольких угловых минут.



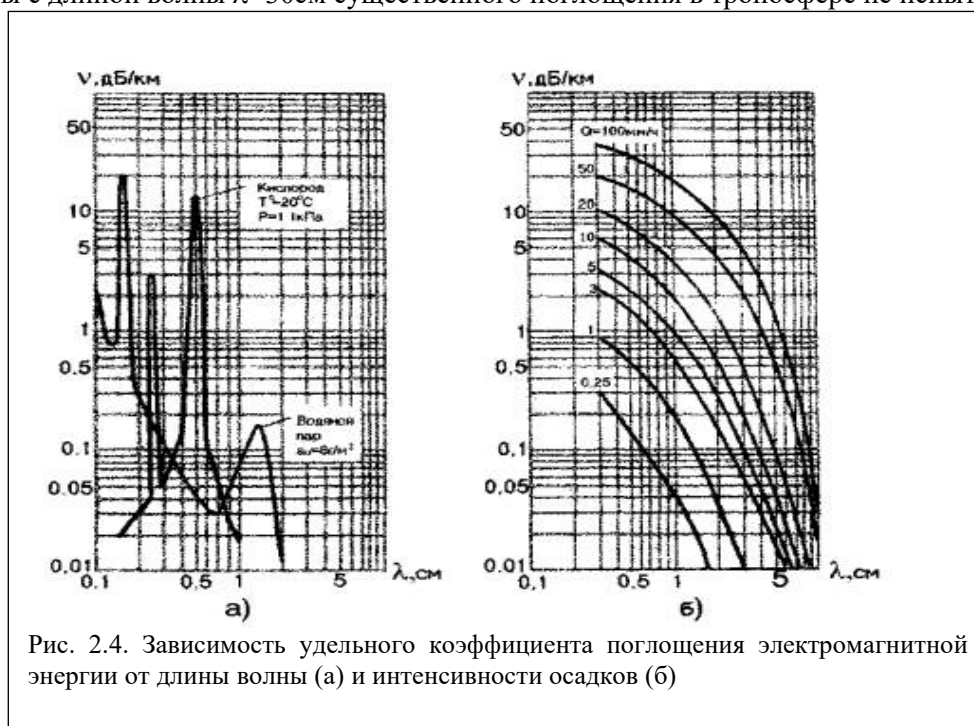
Погрешности  $\Delta R$  и  $\Delta\beta$  имеют систематический характер, могут быть рассчитаны заранее с использованием соответствующей модели тропосферы и скомпенсированы при измерениях навигационных элементов  $W$ .

Поглощение ТВ в основном вызывается поглощением и рассеянием энергии сигнала гидрометеорами (дождь, снег и т.п.), молекулами кислорода и воды, а также пылью и снижает дальность действия РНУ диапазона УКВ. С учетом этих факторов дальность действия РНУ, работающих в УКВ-диапазоне, определяется выражением

$$R_{\max} = R_{\max 0} 10^{-0,05 \nu R_{oc}},$$

где  $R_{\max 0}$  – дальность действия в свободном пространстве, рассчитываемая по формулам раздела 2.1.1;  $\nu$  – удельный коэффициент поглощения (затухания), измеряемый в децибелах на километр;  $R_{oc}$  – протяженность зоны осадков по трассе распространения радиоволны. Поглощение ТВ зависит от длины волны и интенсивности осадков  $Q$  (рис. 2.4).

Сигналы с длиной волны  $\lambda > 30$  см существенного поглощения в тропосфере не испытывают.



Искажения ДНА в вертикальной плоскости обусловлены интерференцией радиоволн, распространяющихся от антенны РНУ по прямому и отраженному от земной поверхности лучам. Отраженный от земной поверхности интерферирующий сигнал (рис. 2.5) появляется при выполнении условия  $0,5\varphi_{0в} > \beta_0$ , где  $\varphi_{0в}$  – ширина главного лепестка ДНА в вертикальной плоскости по уровню нулевой мощности,  $\beta_0$  – угол наклона максимума ДНА к горизонту.

При интерференции указанных сигналов вместо исходной ДНА  $f(\beta)$  формируется искаженная многолепестковая ДНА  $f_{\Sigma}(\beta)$  (рис. 2.6).

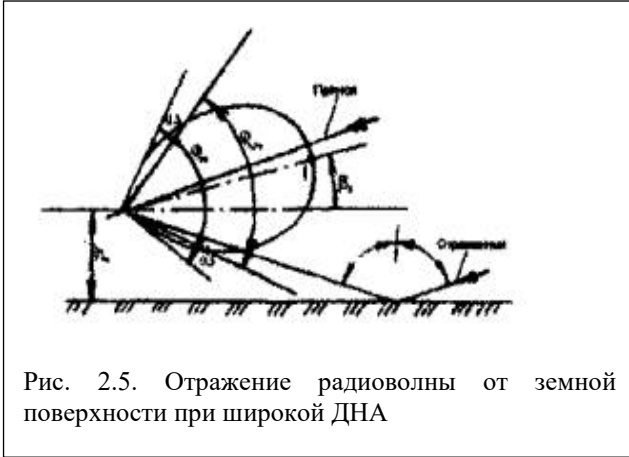


Рис. 2.5. Отражение радиоволны от земной поверхности при широкой ДНА



Рис. 2.6. Искажение ДНА из-за влияния отраженного от земной поверхности сигнала

Методы нахождения  $f_{\Sigma}(\beta)$  в зависимости от  $f(\beta)$  и свойств подстилающей поверхности излагаются в курсе «Антенны и техника СВЧ». Отметим только, что число лепестков и провалов в результирующей ДНА, их положение и ширина зависят от отношения высоты подъема антенны  $h_a$  и длины волны  $\lambda$ . Для уменьшения глубины провалов или изменения их положения применяют несколько разнесенных по высоте антенн, высоты которых выбирают такими, чтобы лепестки одних ДНА перекрывали провалы в других ДНА. К некоторому уменьшению глубины провалов приводит опускание или подъем главного лепестка ДНА. Кроме того, переход от вертикальной поляризации радиоволн к горизонтальной приводит к тому, что лепестки и провалы ДНА меняются местами из-за изменения на  $180^\circ$  фазы отраженного от земной поверхности сигнала. Наконец, возможна суммарно-разностная обработка сигналов, в результате которой также меняются местами лепестки и провалы ДНА.

Влияние ДНА на дальность действия РНУ в вертикальной плоскости проследим по связи КНД антенны по мощности  $G_a(\beta)$  с результирующей ДНА по напряженности поля  $f_{\Sigma}(\beta)$ :  $G_a(\beta) = G_{a0} f_{\Sigma}^2(\beta)$ , где  $G_{a0}$  – максимальное значение КНД антенны. Тогда

$$R_{\max} = \sqrt[4]{K_p G_{a0} f_{\Sigma 1}^2(\beta)} = R_{\max 0} \sqrt{f_{\Sigma}(\beta)},$$

где  $K_p$  – коэффициент, объединяющий все остальные параметры РНУ.

**Поверхностные волны (ПВ).** Поверхностными называют радиоволны, которые распространяются в непосредственной близости к поверхности Земли и огибают сферическую поверхность земного шара вследствие явления дифракции. Особенности распространения ПВ связаны с влиянием почвы (суша, море), над которой проходит радиоволна, и зависят от электрических свойств подстилающей поверхности.



Рис. 2.7. Зависимость напряженности электрического поля поверхностной волны от длины волны на расстоянии 1000км от передатчика: 1–распространение над морем; 2–распространение над сушей

Почва представляет собой полупроводник с комплексной относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon' = \epsilon + j60\sigma\lambda$ , где  $\sigma$  – удельная проводимость почвы. Отношение  $K_{\Pi} = 60\sigma\lambda/\epsilon$  характеризует электрические свойства почвы: при  $K_{\Pi} > 1$  почва по своим свойствам приближается к проводнику, а при  $K_{\Pi} < 0,1$  – к диэлектрику. Основное влияние почва оказывает на поглощение энергии, распространяющейся

над ней волны и на фазу принимаемого сигнала.

Общее представление о характере распространения ПВ можно получить из рис.2.7, где показана зависимость от длины волны напряженности электрического поля радиоволны  $E$  (в децибелах относительно  $1\text{ мкВ/м}$ ) в точке приема, находящейся на расстоянии  $1000\text{ км}$  от передатчика с излучаемой мощностью  $1\text{ кВт}$ .

Практический интерес ПВ представляют при длине волны  $\lambda > 100\text{ м}$ . Дальность действия РВУ на ПВ может достигать до  $3000\text{--}4000\text{ км}$ .

**Дифракция поверхностных радиоволн.** В радиотехнике под *дифракцией* понимают огибание радиоволной встречных препятствий. Для ПВ таким препятствием является шаровой сегмент земной поверхности (рис. 2.8). Дифракция проявляется, когда длина волны сигнала соизмерима с высотой  $h$  этого сегмента, зависящей от длины трассы радиоволны  $l_T$  и составляющей  $7,8\text{ км}$  при  $l_T = 500\text{ км}$  (при  $l_T = 1000\text{ км}$ , например,  $h = 31\text{ км}$ ).

Наименьшее влияние сферичность Земли оказывает на РНУ, работающие на длинных и сверхдлинных волнах ( $\lambda > 1\text{ км}$ ).

**Поглощение ПВ в почве.** Этот фактор проявляется тем сильнее, чем ближе параметры почвы к параметрам диэлектрика, т.е. чем меньше  $K_{\text{п}}$ . Дело в том, что в верхнем (пограничном) слое почвы распространяющаяся над ней волна наводит токи смещения или проводимости, на что тратится часть энергии этой волны. Если отношение  $K_{\text{п}}$  возрастает (т.е. проводимость почвы растет), то радиоволны слабо проникают в почву и потери в ней уменьшаются. С другой стороны, при уменьшении  $K_{\text{п}}$  почва по своим параметрам приближается к диэлектрику, экранирующее действие наведенных в ней токов ослабляется и волна проникает в почву на большую глубину, что приводит к уменьшению энергии полезного сигнала.

Так как отношение  $K_{\text{п}}$  зависит от длины волны, то степень поглощения уменьшается с увеличением  $\lambda$  (при данном значении  $\sigma/\epsilon$ , т.е. при данном виде почвы).

Из сказанного следует, что дальность действия РНУ, работающего на ПВ, увеличивается при распространении радиоволн над морем и с увеличением длины волны (см. рис. 2.7).

**Дополнительный фазовый сдвиг сигнала.** Комплексный характер относительной диэлектрической проницаемости почвы приводит к *дополнительному фазовому сдвигу сигнала*  $\varphi_{\text{д}}$ , снижающему точность фазовых РНУ. Показано, что

$$\varphi_{\text{д}} = 2\text{arctg}K_{\text{п}} - \text{arctg} \frac{K_{\text{п}}}{1 - 1/\epsilon},$$

откуда следует, что на  $\varphi_{\text{д}}$  влияют те же факторы, что и на поглощение ПВ.

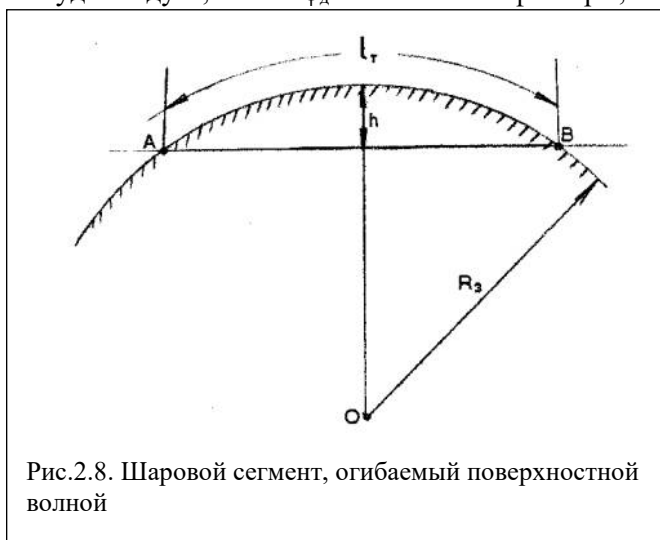


Рис.2.8. Шаровой сегмент, огибаемый поверхностной волной

При анализе точности фазовых РНУ обычно оперируют с так называемой эквивалентной задержкой сигнала  $\Delta t_{\text{д}} = \varphi_{\text{д}}/\omega_0$ , где  $\omega_0$  – несущая частота. Значение  $\Delta t_{\text{д}}$  может достигать до нескольких наносекунд на километр и уменьшается при распространении радиоволны над морем.

**Пространственные радиоволны (ПРВ).** Пространственными называют радиоволны, распространяющиеся на большие расстояния и огибающие земной шар в результате отражения от ионосферы. Такой тип распространения возможен для сигналов с несущей частотой менее  $30\text{ МГц}$  ( $\lambda > 10\text{ м}$ ).

Причина возникновения ПРВ – полное внутреннее отражение из-за многократного преломления радиоволны при переходе последней из одного слоя ионосферы с коэффициентом преломления  $n_i$  в другой слой с  $n_{i+1} < n_i$  (дискретная модель ионосферы). Максимальная частота сигнала, при которой радиоволны отражаются от данного слоя ионосферы при вертикальном падении радиоволны на ионосферу, называется критической частотой:

$$f_{\text{кр}} = \sqrt{80,8 N_{\text{э}}}, \quad (2.13)$$

где  $N_3$ —электронная концентрация в единице объема, а  $f_{кр}$  выражается в герцах. При падении радиоволны на ионосферу с углом падения  $\beta_{п} > 0^\circ$  максимальная частота отражаемого сигнала не должна превышать

$$f_{\max} = f_{кр} \sec \beta_{п} \quad (2.14)$$

Энергия проходящей через ионосферу радиоволны частично расходуется на поддержание колебательного движения свободных электронов с частотой сигнала, которое нарушается из-за столкновений электронов с нейтральными молекулами газов, присутствующих в ионосфере. Приблизительное значение удельного коэффициента поглощения, можно рассчитать по формуле

$$v_{и} \approx 1,35 \cdot 10^{-7} N_3 \xi / f^2, \quad (2.15)$$

где  $\xi$ —число столкновений электронов в единицу времени;  $f$ —частота сигнала, Гц.

Из соотношения (2.15) следует, что при заданном значении  $N_3 \xi$  (например,  $10^{17}$  для слоя E ионосферы или  $10^{15}$  для слоя F) поглощение уменьшается при увеличении несущей частоты сигнала.

Особенностью ПРВ, отрицательно влияющей на работу РНУ, является крайняя нестабильность параметров принимаемого сигнала (амплитуды, фазы, времени распространения и поляризации), что связано со случайными изменениями  $N_3$  и  $\xi$ , зависящими, главным образом, от интенсивности ионизирующей радиации Солнца. Эта особенность существенно ограничивает область применения ПРВ в радионавигации.

**Радиоволны волноводного типа (РВТ).** К этому типу относятся радиоволны, распространяющиеся на очень большие расстояния в своеобразном сферическом волноводе, образованном земной поверхностью и нижней областью ионосферы, расположенной на высоте 70–90км. Из соотношений (2.13) и (2.14) следует, что при больших углах падения  $\beta_{п}$  и значениях  $N_3$ , характерных для нижних слоев D и E ионосферы ( $N_3 \approx 10^8 - 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ) от этих слоев могут отражаться сигналы, длина волны которых превышает несколько километров. Существенно, что чем больше длина волны, тем ниже граница отражающего радиоволну слоя ионосферы, т.е. тем меньше "глубина" проникновения волны в ионосферу и меньше потери энергии сигнала, несмотря на значительный удельный коэффициент поглощения  $v_{и}$  в отражающей волну области. Потери в отражающей области ионосферы являются главной причиной затухания сигнала РВТ, так как потери при отражении от проводящей поверхности Земли практически отсутствуют (для радиоволн диапазонов длинных (ДВ) и сверхдлинных (СДВ) волн почва представляет собой проводник). Максимальное значение удельного коэффициента поглощения составляет примерно 0,001дБ/км. Незначительное поглощение и многократное отражение волны от "стенок" сферического волновода позволяют получить дальность действия РНУ на РВТ, достигающую до 10000км при излучаемой мощности 10 кВт. Сравнительно большая стабильность параметров отражающих слоев ионосферы способствует достаточно высокому постоянству сигнала в точке приема.

**Сравнение свойств радиоволн различных типов.** Возможности использования радиоволн различных типов для навигационных целей иллюстрируются табл. 2.2, из которой следует, что для РНУ наиболее предпочтительны ТВ. Именно поэтому большинство РНУ работает в диапазоне УКВ и обслуживает зону с радиусом, равным дальности прямой видимости  $R_{пв}$ . Увеличение дальности распространения радиоволны до  $R_{рв} > R_{пв}$  достигают, применяя ПВ и особенно РВТ, которые используются в РНУ дальней навигации, несмотря на высокий уровень помех в этих диапазонах радиоволн.

$R_{рв}$ —дальность распространения радиоволны данного типа. Стабильность условий распространения дает возможность моделирования этих условий и учета особенностей распространения при измерениях навигационных элементов.



Таблица 2.2

Тип волны	Основной диапазон		$R_{рв}$ , км	Интенсивность атмосферных помех	Стабильность условий распространения
	Название	$\lambda$ м			
ТВ	УКВ	0,01-10	$R_{пв}$	Малая	Высокая
ПВ	ДВ	>100	3000	$\sim \lambda$	Средняя
ПРВ	КВ	>10	>1000	Высокая	Плохая
РВТ	СДВ	>10000	<10000	$\sim \lambda$	Высокая

## 2.2. Точность позиционных РНС.

### 2.2.1. Общие сведения.

Позиционные РНС представляют собой наиболее широкий класс систем определения местоположения (МП). Этим объясняется необходимость отдельного рассмотрения их точностных характеристик. Факторы, влияющие на точность систем счисления пути и обзорно-сравнительных систем, приведены в разделах, посвященных автономным РНС.

**Структура позиционных систем.** В любой позиционной системе (рис. 2.9а) можно выделить следующие устройства:

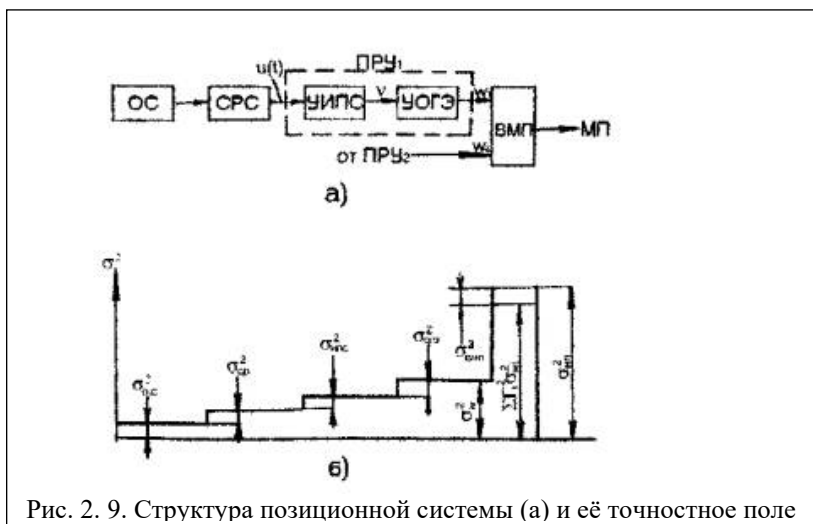


Рис. 2. 9. Структура позиционной системы (а) и её точностное поле

опорную станцию (ОС), приемное радионавигационное устройство (ПРУ) и вычислитель местоположения (ВМП). Передающая и приемная части системы связаны через среду распространения сигналов СРС.

Наиболее важными составляющими ПРУ, параметры которых существенно влияют на точность местоопределения, являются устройства измерения информативного параметра

сигнала УИПС и определения геометрического элемента УОГЭ. Последнее устройство рассчитывает дальность, угловые координаты и другие геометрические элементы  $W$ , характеризующие МП, используя измеренный информативный параметр сигнала  $v$ .

Для определения разнородных элементов  $W$  требуются различные ПРУ, данные которых объединяются в ВМП, где решается геометрическая задача вычисления МП по пересечению поверхностей или линий положения.

**Источники погрешностей местоопределения.** Каждый из элементов системы влияет на ее точность, внося свою среднюю квадратическую погрешность (СКП)  $\sigma_i$ . Искажения сигнала в среде распространения СРС учитываются погрешностью  $\sigma_{cp}$ . При нахождении местоположения приходится принимать во внимание форму поверхностей (или линий) положения и геометрические особенности взаимного расположения объекта и опорных станций, вводя коэффициент  $\Gamma$ , называемый *геометрическим фактором* и связывающий  $\sigma_{мп}$  – СКП определения МП с  $\sigma_w$  – СКП измерения  $W$ :

$$\sigma_{мп} = \Gamma \sigma_w, \quad (2.16)$$

С учетом сказанного  $\sigma_{мп}$  может быть найдена только при анализе точностного поля системы (рис. 2.9, б) и при независимости погрешностей, вносимых всеми элементами системы, составит

$$\sigma_{мп} = \sqrt{\Gamma^2 \left[ M^2 (\sigma_{ос}^2 + \sigma_{cp}^2 + \sigma_{ипс}^2) + \sigma_{огэ}^2 \right] + \sigma_{вмп}^2},$$

где  $M$  – масштабный коэффициент или коэффициент пересчета результатов измерения  $v$  в значения  $W$ .

Погрешности  $\sigma_{oc}$  и  $\sigma_{вмп}$  могут быть сведены к приемлемому минимуму при тщательном конструировании опорной станции и аппаратуры объекта, а составляющая  $\sigma_{cp}$  зависит от рабочей частоты системы, типа ее антенн, характера окружающих опорную станцию и объект предметов и от ряда подобных специфических факторов. Поэтому остановимся на наиболее общих причинах снижения точности определения местоположения.

### 2.2.2. Точность определения геометрического элемента, характеризующего положение объекта.

В большинстве РНС связь определяемого геометрического элемента  $W$  (координат объекта или зависящих от них величин) с измеряемым параметром сигнала  $v$  может быть описана уравнением,

$$\boxed{W = Mv}, \quad (2.17)$$

которое является исходным при нахождении погрешности определения  $W$ . Действительно, беря полный дифференциал (2.17) и переходя к конечным приращениям, можно получить

$$\boxed{\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta v}{v}} \quad (2.18)$$

где  $\Delta M$  и  $\Delta v$  имеют смысл текущих значений погрешностей, обусловленных соответственно нестабильностью масштабного коэффициента и недостаточной точностью измерительного устройства.

Возводя обе части выражения (2.18) в квадрат и усредняя полученный результат в предположении независимости погрешностей  $\Delta M$  и  $\Delta v$ , получаем основное уравнение, связывающее СКП погрешности  $\sigma_w$  определения элемента  $W$  с дисперсиями  $\sigma_m^2$  и  $\sigma_v^2$ , обусловленными указанными причинами:

$$\boxed{\frac{\sigma_w}{W} = \left[ \left( \frac{\sigma_m}{M} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_v}{v} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (2.19)$$

Из уравнения следуют два направления уменьшения погрешности  $\sigma_w$  и в итоге повышения точности местоопределения. Первое связано с уменьшением погрешности  $\sigma_m$ , которая тем меньше, чем выше стабильность масштабного коэффициента. Поэтому при проектировании РНУ обычно принимают меры по стабилизации масштабного коэффициента (или учитывают, если это возможно, его нестабильность). При выполнении условия  $M = \text{const}$  уравнение погрешностей (2.19) принимает вид

$$\sigma_w = M\sigma_v.$$

Нижняя граница  $\sigma_v$ , достижимая при оптимальном построении измерителя  $v$ , задается потенциальной точностью. Неоптимальность схемы измерителя информативного параметра сигнала приводит к росту погрешности по сравнению с потенциальной. Поэтому второй способ повышения точности местоопределения сводится к уменьшению масштабного коэффициента  $M$ . Этот путь позволяет получить практически приемлемое значение  $\sigma_w$  при заданном или возможном на данном уровне развития техники значении  $\sigma_v$ .

Соотношения для флуктуационных погрешностей  $(\sigma_v)_n$ , характеризующих потенциальную точность измерения информативных параметров сигнала  $v$ , приведены в табл.3. Там же указано, при определении каких навигационных элементов  $W$  этот вид  $v$  наиболее широко используется в современных РНУ.

В табл.2.3 приняты следующие обозначения:  $\tau$  – время задержки сигнала;  $U, F, \varphi$  – амплитуда, частота и фаза сигнала;  $R, \theta, V_r$  – дальность, угловая координата ( $\alpha$  или  $\beta$ ) и радиальная скорость объекта;  $q$  – отношение мощности сигнала к мощности шума приемного тракта при оптимальном построении последнего;  $\Delta F_{ск}$  и  $T_{ск}$  – среднеквадратические ширина спектра и длительность сигнала.

Таблица 2.3.

Вид $\nu$	РНУ, использующие данный вид $W$ :			$(\sigma_\nu)_п$
	$R$	$\theta$	$V_r$	
$\tau$	++	+	0	$[2\pi\Delta F_{\text{СК}}\sqrt{q}]^{-1}$
$U$	0	++	0	$U/\sqrt{q}$
$F$	+	0	++	$[T_{\text{СК}}\sqrt{q}]^{-1}$
$\varphi$	+	++	0	$[\sqrt{q}]^{-1}$

Для расчета последних параметров сигнала служат известные формулы:

$$F_{\text{СК}}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f^2 |S(f)|^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df},$$

$$T_{\text{СК}}^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} t^2 |U(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |U(t)|^2 dt},$$

где  $S(f)$  – спектральная плотность сигнала  $U(t)$ .

**Предельная точность радионавигационных измерений.** Эта величина ограничена, как следует из раздела 1.2, степенью достоверности принятого при расчетах значения скорости распространения радиоволн. Влияние нестабильности этой скорости наиболее просто рассмотреть на примере определения дальности до объекта по результатам измерения времени  $t_R$ , необходимого радиоволне для прохождения расстояния  $R$  между передающей и приемной антеннами:

$$t_R = R/c$$

Зная это время, можно определить расстояние до цели  $R = ct_R$  с относительной точностью

$$\Delta R/R = \Delta c/c + \Delta t/t.$$

Полагая  $\Delta c$  и  $\Delta t$  случайными и взаимно независимыми величинами, находим точность РД

$$\sigma_{R/R} = \sqrt{\left(\sigma_c/c\right)^2 + \left(\sigma_t/t_R\right)^2}$$

Дисперсия  $\sigma_c^2$  обусловлена точностью, с которой известны скорость распространения радиоволн и ее непостоянство вдоль данной трассы. В реальной среде  $\sigma_c/c = 10^{-4} - 10^{-6}$ . Поэтому даже при идеальной аппаратуре, когда  $\sigma_t = 0$ , точность измерения дальности (*предельная точность дальнометрии*) зависит от степени знания и учета составляющей  $\sigma_c$ :

$$(\sigma_R)_{\text{ПРЕД}} = R(\sigma_c/c).$$

Как следует из этого соотношения, особенное значение  $\sigma_c/c$  имеет при измерении больших дальностей. Так при  $R=10^5$  км  $\sigma_R \geq 100$  м, что недопустимо для высокоточных РНС. Поэтому в современных РНС (например, в спутниковых) применяют специальные меры, с помощью которых можно получить в реальных условиях относительную погрешность дальнометрии порядка  $10^{-7}$ . С этой целью можно использовать методы, позволяющие определить или исключить погрешность, вызываемую непостоянством скорости распространения радиоволн. Наилучшие результаты дает метод, основанный на измерении одной и той же дальности на двух частотах. Например, при

распространении сигнала через ионосферу используется зависимость погрешности измерения дальности  $\Delta R$  от частоты  $f$  сигнала:  $\Delta R = Kf^{-2}\psi$ , где  $K$  – постоянный коэффициент,  $\psi$  – неизвестная функция, зависящая от параметров ионосферы. Истинное расстояние  $R$  определяется по результатам измерения  $R_{\text{изм}}$  из решения системы уравнений:

$$\begin{aligned} R_{\text{изм1}} &= R + \Delta R_1 = R + Kf_1^{-2}\psi; \\ R_{\text{изм2}} &= R + \Delta R_2 = R + Kf_2^{-2}\psi. \end{aligned}$$

### 2.2.3. Погрешность определения линии положения.

В наиболее простом случае, когда положение объекта на плоскости находится по пересечению двух линий положения (ЛП), погрешность местоопределения будет зависеть от погрешности  $\Delta l$  нахождения каждой из ЛП. За погрешность  $\Delta l$  обычно принимают минимальное расстояние в



Рис. 2.10. Семейство линий положения

точке расположения объекта между истинной ЛП и ЛП\*, найденной по результатам определения элемента  $W$  (рис. 2.10). Примем, что погрешность определения  $W$  равна  $\Delta W$  и имеет, как и  $\Delta v$ , гауссовский закон распределения с нулевым средним значением.

Элементу  $W$  на плоскости соответствует семейство ЛП. Это семейство можно представить как скалярное поле элемента  $W$ , причем линии уровня этого поля и есть ЛП. Воспользовавшись теорией скалярного поля, можно найти градиент изменения элемента  $W$ :  $|\text{grad}W| = dW/dl$ , который представляет собой вектор, перпендикулярный линиям положения и направленный в сторону возрастания  $W$ . Переходя к конечным приращениям,

получаем

$$\Delta l = \frac{1}{|\text{grad}W|} \Delta W = K_{\text{ЛП}} \Delta W, \quad (2.20)$$

где  $K_{\text{ЛП}}$  – коэффициент погрешности определения ЛП (единицы длины/единицы параметра).

При гауссовском законе распределения погрешностей  $\Delta W$  погрешности  $\Delta l$  также распределены по гауссовскому закону с нулевым, как правило, средним значением и дисперсией  $\sigma_{\text{ЛП}}^2$ . Возводя обе части равенства (2.20) в квадрат, усредняя и извлекая квадратный корень из результата, находим

$$\sigma_{\text{ЛП}} = K_{\text{ЛП}} \sigma_W, \quad (2.21)$$

где  $\sigma_{\text{ЛП}}$  и  $\sigma_W$  – СКП нахождения линии положения и определения элемента  $W$ .

Из (2.21) следует, что при одной и той же погрешности  $\sigma_W$  можно снизить погрешность  $\sigma_{\text{ЛП}}$ , непосредственно влияющую на точность местоопределения, уменьшив коэффициент  $K_{\text{ЛП}}$ , который зависит от вида ЛП.

Для нахождения  $K_{\text{ЛП}}$  необходимо представить  $W$  как функцию координат  $X, Y$  некоторой, например прямоугольной, системы координат. Тогда

$$K_{\text{ЛП}} = |\text{grad}W|^{-1} = \left[ (\partial W / \partial x)^2 + (\partial W / \partial y)^2 \right]^{-1/2}, \quad (2.22)$$

Найдем  $K_{\text{ЛП}}$  для наиболее распространенных дальномерного и угломерного устройств. В радиодальномерном устройстве определяемый элемент в прямоугольной системе координат (рис.2.11,а) записывается как  $W=R=(x^2+y^2)^{1/2}$  и линии положения представляют собой окружности с центром в точке установки радиодальномера. Тогда  $|\text{grad}W|=1$  и  $K_{\text{ЛП}}=1$ . Следовательно  $\sigma_{\text{ЛП}}=\sigma_R$ . Таким образом, при заданной погрешности радиодальномера  $\sigma_R$  погрешность определения ЛП постоянна и не зависит от дальности. В угломерном устройстве, установленном в точке  $O$  (рис. 2.11,б), определяется, например, азимут  $\alpha$ . Элемент  $W$  в прямоугольной системе координат записывается как  $W=\alpha=\text{arctg}(x/y)$ , откуда  $|\text{grad}W|=(x^2+y^2)^{-1/2}=R^{-1}$ . Следовательно  $\sigma_{\text{ЛП}}=R\sigma_\alpha$ . Таким образом, при заданной погрешности угломерного устройства  $\sigma_\alpha$  погрешность определения ЛП (радиальные прямые) тем больше, чем больше расстояние до объекта.

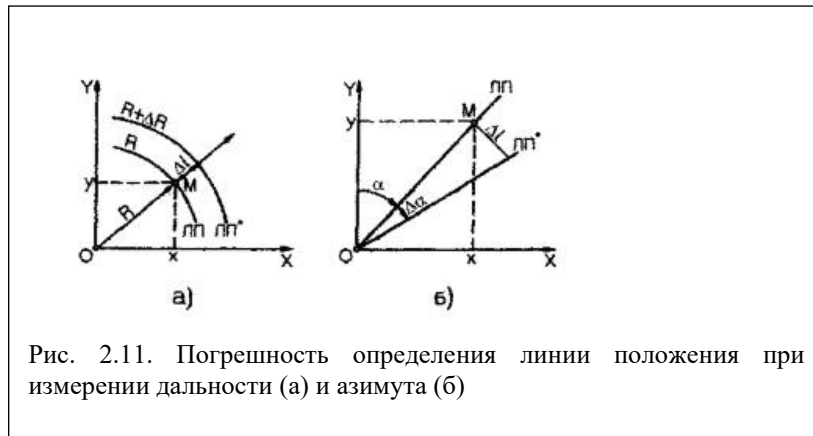


Рис. 2.11. Погрешность определения линии положения при измерении дальности (а) и азимута (б)

Данное обстоятельство является серьезным недостатком угломерных устройств. Заметим, что подобная зависимость погрешности  $\sigma_{лп}$  от дальности имеет место и в разностно-дальномерных устройствах. На больших дальностях линии положения этих устройств (гиперболы) практически совпадают со своими асимптотами – прямыми, радиально расходящимися из

центра базы устройства.

#### 2.2.4. Погрешность местоопределения

Связь СКП определения местоположения  $\sigma_{мп}$  с СКП  $\sigma_{w1}$  и  $\sigma_{w2}$  устройств, входящих в данную систему. Погрешности  $\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$ , как показано на рис.2.12 приводят к погрешности  $\Delta_{мп}$  определения МО.



Рис.2.12. Погрешность определения места объекта

Если  $\gamma$  – угол пересечения линий положения ЛП в точке МО, то при одинаковых знаках  $\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$  из треугольника ADB следует, что  $\Delta_{мп}^2 = AD^2 + DB^2 - AD \cdot DB \cos \gamma$ . Если  $\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$  имеют разные знаки, то последний член формулы будет положительным. Выразим стороны треугольника через погрешности линий положения, где знак «плюс» будет при разных знаках  $\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$ :

$$\Delta_{мп}^2 = \sin^{-2} \gamma (\Delta l_1^2 + \Delta l_2^2 \mp 2 \Delta l_1 \Delta l_2 \cos \gamma)$$

Удобной мерой случайной величины  $\Delta_{мп}$  является

СКП местоопределения:

$$\sigma_{мп} = (\sin \gamma)^{-1} (\sigma_{лп1}^2 + \sigma_{лп2}^2 \mp 2 \rho \sigma_{лп1} \sigma_{лп2} \cos \gamma)^{1/2},$$

где  $\rho$  – коэффициент корреляции погрешностей  $\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$ . Для большинства систем  $\rho=0$ , что свидетельствует о независимости определения линий положения входящими в систему устройствами. Принимая  $\rho=0$  и выражая погрешности  $\sigma_{лп}$  через коэффициенты линий положения и соответствующие погрешности, находим оценку точности местоопределения:

$$\sigma_{мп} = (\sin \gamma)^{-1} \left[ (K_{лп1} \sigma_{w1})^2 + (K_{лп2} \sigma_{w2})^2 \right]^{1/2} \quad (2.23)$$

Физический смысл формулы (2.23), заключается в следующем. Если построить окружность с центром в точке, где расположен объект, с радиусом, равным допустимому значению  $\sigma_{мп}$ , т.е.  $\sigma_{мпд}$ , то вероятность того, что при измерениях погрешность  $\Delta_{мп}$  окажется внутри этой окружности, т.е. не будет превышать  $\sigma_{мпд}$ , равна 0,63–0,68. Если взять радиус окружности равным  $2\sigma_{мпд}$ , то эта вероятность лежит в пределах 0,95–0,98. Отличие указанных вероятностей от значений 0,68 и 0,95, принятых для соответствующих погрешностей, объясняется тем, что закон распределения  $\Delta_{мп}$  не является гауссовским (в простейшем случае при  $\gamma=90^\circ$  и  $\sigma_{w1}=\sigma_{w2}$  это закон Рэлея).

Полученные результаты могут быть использованы для построения рабочих зон позиционных систем. Погрешность определения пространственного положения объекта при независимости результатов измерений всех координат

$$\sigma_{ПМ} = \sin^{-1} \gamma_1 (\sigma_{мп}^2 + \sigma_{лп3}^2)^{1/2},$$

где  $\gamma_1$  – угол между третьей поверхностью положения и линией положения на плоскости;  $\sigma_{мп}$  вычисляется по формуле (2.23), а  $\sigma_{лп3}$  – СКП нахождения третьей поверхности положения.

**Геометрический фактор.** Из (2.23) следует, что погрешность местоопределения зависит не только от точности нахождения элемента  $W$ , но и от типа позиционной системы, влияющего на значение  $K_{лп}$ , и от расположения опорных станций и объекта, которое сказывается на значении угла  $\gamma$  и на коэффициенте  $K_{лп}$ . Для пояснения сказанного рассмотрим системы, состоящие из однотипных устройств (измерителей дальности или углов). В таких системах, к числу которых относятся дальномерные, разностно-дальномерные, угломерные и некоторые другие, естественно предположить, что точность определения элемента  $W$  одинакова, т. е.  $\sigma_{w1}=\sigma_{w2}=\sigma_w$ . Так как по условию  $K_{лп1}=K_{лп2}=K_{лп}$ ,

$$\sigma_{мп} = (K_{лп} / \sin \gamma) \sigma_w \sqrt{2} = \Gamma \sigma_w, \quad (2.24)$$

где  $\Gamma$  – геометрический фактор (иногда  $\sqrt{2}$  не включают в  $\Gamma$ ) Для нахождения геометрического фактора многопозиционных РНС можно воспользоваться данными о точностных характеристиках этих систем. В системах, состоящих из однотипных устройств,  $\sigma_{w1}=\sigma_{w2}=\sigma_w$ . Коэффициент корреляции погрешностей  $\rho$  можно принять равным нулю. Для всех однобазовых систем ( $n=1$ ) точность местоопределения максимальна на перпендикуляре к базе, т. е. при  $\theta_0=\pi/2$ . В двухбазовых системах ( $n=2$ ) наивысшей точности соответствует  $\theta_0=\pi/4$ .

### 2.2.5. Рабочие зоны позиционных РНС.

Рабочая зона – важнейший тактический параметр, позволяющий определить число и

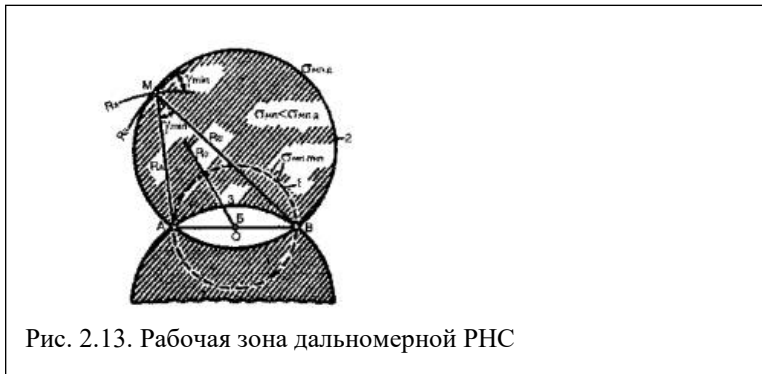


Рис. 2.13. Рабочая зона дальномерной РНС

целесообразное взаимное размещение РНС в данном районе. Обычно известны значения погрешностей устройств системы  $\sigma_{w1}$  и  $\sigma_{w2}$  и допустимое значение погрешности местоопределения  $\sigma_{мп,д}$ , и для расчета границы рабочей зоны пригодно выражение (2.23).

Рассмотрим примеры построения рабочих зон наиболее распространенных дальномерной,

угломерно–дальномерной и угломерной систем. Допустим, что в дальномерной системе дальность объекта находящегося в точке  $M$  (рис. 2.13) и имеющего запросчик дальномера, определяется с одинаковой точностью  $\sigma_w=\sigma_{R1}=\sigma_{R2}=\sigma_R$  по двум ответчикам, разнесенным на расстояние  $B$  (база системы).

В такой системе  $K_{лп}=1$ , угол  $\gamma=\gamma_{min}$  и выражение (2.23) принимает форму, соответствующую указанной в табл. 2.4. Кривые равной точности, на которых  $\sigma_{мп}=\text{const}(\gamma=\text{const})$ , представляют собой окружности, опирающиеся на базу системы как на хорду.

Таблица 2.4.

Тип системы	$\sigma_w$	$K_{лп}$	$\sigma_{мп,д}$
Дальномерная активная	$\sigma_R$	1	$\sin^{-1}\gamma_{min}\sigma_R\sqrt{2}$
Угломерно-дальномерная	$\sigma_\alpha$ $\sigma_R$	$K_{лп1}=R$ $K_{лп2}=1$	$(\sigma_\alpha^2 R^2 + \sigma_R^2)^{1/2}$
Угломерная	$\sigma_\alpha$	$R$	$\sigma_\alpha \sin^{-1}\gamma (R_A^2 + R_B^2)^{1/2}$

Окружность 1, для которой  $\gamma=90^\circ$ , – кривая максимальной точности  $\sigma_{мп.мин}=\sigma_R\sqrt{2}$ . Кривая 2, соответствующая  $\sigma_{мп}=\sigma_{мп.д}$ , представляет собой внешний контур рабочей зоны. Внутренний контур рабочей зоны – окружность 3, на которой также  $\sigma_{мп}=\sigma_{мп.д}$ .

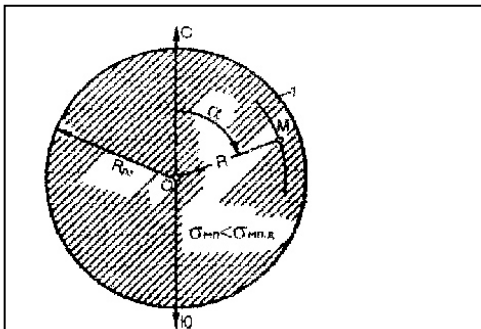


Рис. 2.14. Рабочая зона дальномерно-угломерной РНС

Пусть в точке О (рис.2.14) находятся совмещенные угломерное и дальномерное устройства.

В такой угломерно-дальномерной системе  $\gamma=90^\circ$ . Рабочая зона имеет форму окружности с центром в точке О и радиусом, определяемым из выражения, приведенного в табл. 2.3.

Пусть в точках А и В (рис. 2.15) располагаются угломерные устройства, обладающие одинаковой точностью  $\sigma_{\alpha 1}=\sigma_{\alpha 2}=\sigma_{\alpha}$ .

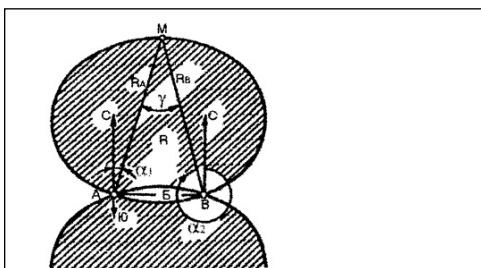


Рис. 2.15. Рабочая зона угломерной РНС

Выражение для расчета рабочей зоны такой угломерной системы (см. табл. 2.4) содержит три неизвестных, и контуры этой зоны могут быть построены только с помощью ЭВМ.

Размеры рабочей зоны любой системы возрастают при повышении точности устройств, используемых для определения местоположения, и увеличении допустимой погрешности  $\sigma_{мп.д}$ . На больших дальностях, как следует из табл. 2.3, погрешность  $\sigma_{мп}$  угломерных систем увеличивается пропорционально квадрату дальности  $R$ , а угломерно-дальномерных — пропорционально  $R$ , что приводит к сокращению размеров рабочей зоны. Этот

эффект несвойственен дальномерным системам, что обуславливает их перспективность.

В Приложении 2 приведены алгоритмы расчета основных параметров рабочих зон наиболее известных РНС.