

Энергетический расчет РЛС

Цель расчета – определение отношения q сигнал/помеха и(или) сигнал/шум на входе приемника РЛС. В каждой конкретной задаче должно быть специально определено, что понимается под отношением сигнал/помеха и(или) сигнал/шум.

В простейшем случае рассматривается только внутренний шум приемника, который принимается белым и нормальным с параметрами $(0, \sigma_{\text{ш}})$.

Возможны и используются различные определения отношения сигнал/шум:

- визуальная интерпретация: $q = U_c / \sigma_{\text{ш}}$ - корректна при амплитудном детектировании, не учитывает длительность сигнала;

- каноническое определение: $q = \sqrt{\frac{2E}{N_0}}$, $\frac{N_0}{2} \Delta f = \sigma_{\text{ш}}^2$

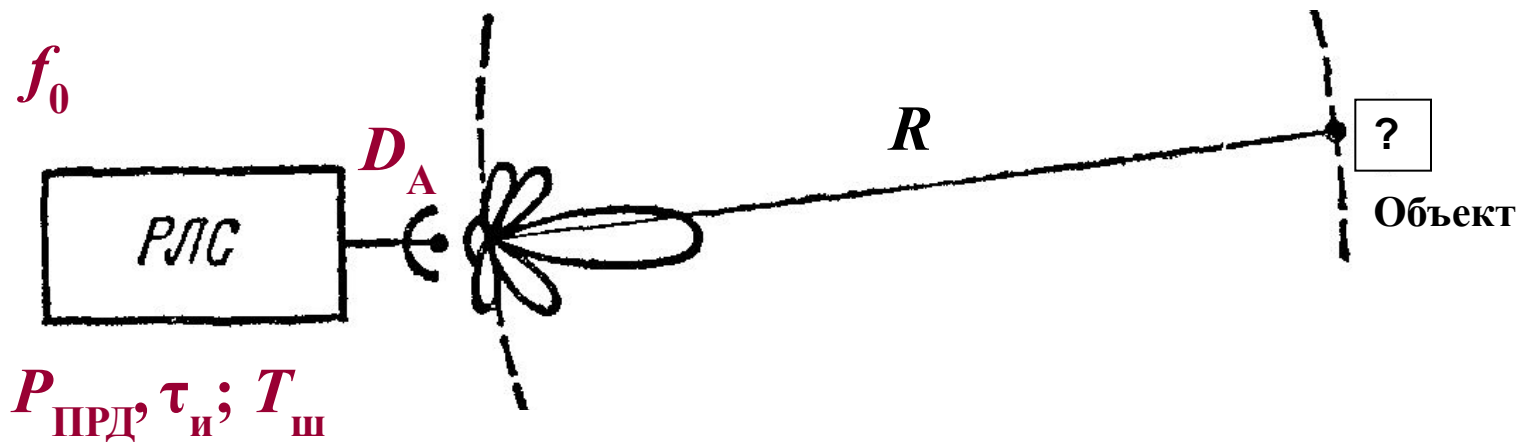
$N_0/2$ – спектральная плотность белого шума.

Выбор параметров РЛС должен обеспечить условие: $q \geq q_{\text{пор}}$,

где $q_{\text{пор}}$ – минимальное отношение сигнал/шум, при котором РЛС выполняет свои функции с заданным качеством.

Допущения:

- свободное пространство (не учитывается наличие атмосферы и подстилающей поверхности);
- объект – точечный.



Расчет:

Плотность потока мощности прямой волны в точке объекта (цели)

$$\Pi_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{ПРД}}}{4\pi R^2} G_{\text{А}}$$

Модель переизлучения:

- «прием» падающей радиоволны на эквивалентную антенну, характеризующуюся площадью $\sigma_{\text{ц}}$ [м²];
- изотропное излучение всей принятой мощности.

Новое понятие **«эффективная площадь рассеяния» (ЭПР) — $\sigma_{\text{ц}}$**

Понятие ЭПР будет рассмотрено позднее.

Мощность «принятая» целью равна

$$P_{\text{ц}} = \Pi_{\text{ц}} \sigma_{\text{ц}} = \frac{P_{\text{ПРД}}}{4\pi R^2} G_{\text{А}} \sigma_{\text{ц}}$$

Эта мощность излучается изотропно (в соответствии с определением ЭПР). Плотность потока мощности отраженной волны в точке РЛС

$$\Pi_{\text{РЛС}} = \frac{P_{\text{ц}}}{4\pi R^2} = \frac{P_{\text{ПРД}}}{(4\pi)^2 R^4} G_{\text{А}} \sigma_{\text{ц}}$$

Мощность сигнала на входе приемника РЛС определяется площадью антенны S_A

$$P_c = \Pi_{\text{РЛС}} S_A = \frac{P_{\text{ПРД}}}{(4\pi)^2 R^4} G_A \sigma_{\text{ц}} S_A$$

Используем соотношение из теории антенн:

$$G_A = \frac{4\pi S_A}{\lambda^2} \Rightarrow S_A = \frac{\lambda^2 G_A}{4\pi}$$

Получим (полагаем, что РЛС – импульсная, и используется единая антенна на передачу и прием)

$$P_c = \frac{P_{\text{ПРД}} G_A^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 R^4}$$

Далее в соответствующем разделе эта формула будет дополнена коэффициентом, учитывающим потери при распространении радиоволн.

Условие $q \geq q_{\text{пор}}$ можно представить в виде $P_c \geq P_{c \text{ мин}}$, тогда

$$\frac{P_{\text{ПРД}} G_A^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 R^4} \geq P_{c \text{ мин}} \Rightarrow R_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ПРД}} G_A^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 P_{c \text{ мин}}}} \text{ или } R_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ПРД}} S_A^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi) P_{c \text{ мин}} \lambda^2}}$$

Важные выводы:

- дальность действия пропорциональна корню четвертой степени из энергетических параметров;
- дальность действия пропорциональна корню из частоты.

Конкретизируем полученный результат для частного случая:

- (помеха+шум) \rightarrow только шум, который характеризуется параметром шумовая температура $T_{\text{ш}}$;
- импульсная РЛС \rightarrow амплитуда $U_{\text{и}}$ и длительность $\tau_{\text{и}}$;

$$P_{\text{ш}} = kT_{\text{ш}} \Delta f = \sigma_{\text{ш}}^2 / r, \text{ где } k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К,}$$

Δf – ширина полосы приемника, r – входное сопротивление.

Полагаем, что излученный радиоимпульс возвращается в точку РЛС также в виде радиоимпульса

$$P_c = \frac{E_c}{\tau_{и}} = \frac{U_{и}^2}{2r}$$

Вводим отношение сигнал/шум $q = U_{и} / \sigma_{ш}$. Тогда

$$q^2 = \frac{U_{и}^2}{\sigma_{ш}^2} = \frac{2P_c}{\sigma_{ш}^2} = \frac{2P_{\text{ПРД}} G_A^2 \lambda^2 \sigma_{ц}}{(4\pi)^3 R^4 kT_{ш} \Delta f} \geq q_{\text{пор}}^2$$

и, соответственно,

$$R_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{2P_{\text{ПРД}} G_A^2 \lambda^2 \sigma_{ц}}{(4\pi)^3 q_{\text{пор}}^2 kT_{ш} \Delta f}} \quad \text{или} \quad R_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{4E_{и} G_A^2 \lambda^2 \sigma_{ц}}{(4\pi)^3 q_{\text{пор}}^2 kT_{ш}}}$$

при условии $\Delta f = 2/\tau_{и}$.

При проектировании РЛС применяется системный подход

$$R_{\text{макс}} = 4 \sqrt{\frac{2P_{\text{ПРД}} G_A^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 q_{\text{пор}}^2 kT_{\text{ш}} \Delta f}}$$

Для достижения заданных качественных показателей **обнаружения** разработчик может варьировать:

- параметры излучаемого импульса;
- параметры антенны;
- рабочую частоту (?);
- шумовую температуру приемника;
- способы модуляции сигнала.

Каждое принятое решение может быть оценено по стоимости при производстве и при эксплуатации, массогабаритным характеристикам и т.п.

Энергетический расчет реальной РЛС

РЛС FR-2155



Диапазоны дальности и разрешение (миль):

Range: 0.125, 0.25, 0.5, 0.75, 1.5, 3, 6, 12, 24, 48, 96

Ring: 0.025, 0.05, 0.1, 0.25, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16

АНТЕННА:

Щелевая волноводная антенная решетка.

Скорость вращения 24 / 42 об/мин.

Размер: 10; 8; 6,5 и 4 фута.

Ширина луча:

в горизонтальной плоск.: 0,75; 0,95; 1,2; 1,8 град.

в вертикальной плоск.: 20 град.

ПРИЕМОПЕРЕДАТЧИК:

Максимальная мощность излучения - 50 кВт

Длительность и частота следования импульсов:

от 0.07 мкс/3000 Гц (диап. 0.125 - 0.25 миль)

до 1.2 мкс/600 Гц (диап. 48, 96 миль)

Частота - 9415±30 МГц (X-band)

Промежуточная частота - 60 МГц

Шум – 6 Дб



Энергетический расчет реальной РЛС

$$R_{\text{макс}} = \sqrt[4]{\frac{2P_{\text{ПРД}} G_A^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 q_{\text{пор}}^2 kT_{\text{ш}} \Delta f}}$$

- $P_{\text{с}} = 50$ кВт, $\tau_{\text{и}} = 1,2$ мкс $\rightarrow E_{\text{и}} = 0,06$ Дж
- $\lambda = 3,2$ см
- $G_A = 4\pi S_A / \lambda^2 \approx 5000$ (приближенная оценка для $D_A = 10$ фт)
- $\sigma_{\text{ц}} = 300$ м² (небольшое судно)
- $q_{\text{пор}} = 4$
- $T_{\text{ш}} = 1200$ К

Получим $R_{\text{макс}} \approx 205$ км (по ТТХ – 96 морских миль).

Эффективная площадь рассеяния цели

- Падающие на объект радиоволны возбуждают на его поверхности (в объеме) токи проводимости или смещения, которые зависят от материала, формы и размеров объекта.
- Эти токи, в свою очередь, вызывают вторичное ЭМП.

Пример: металлическая сфера.

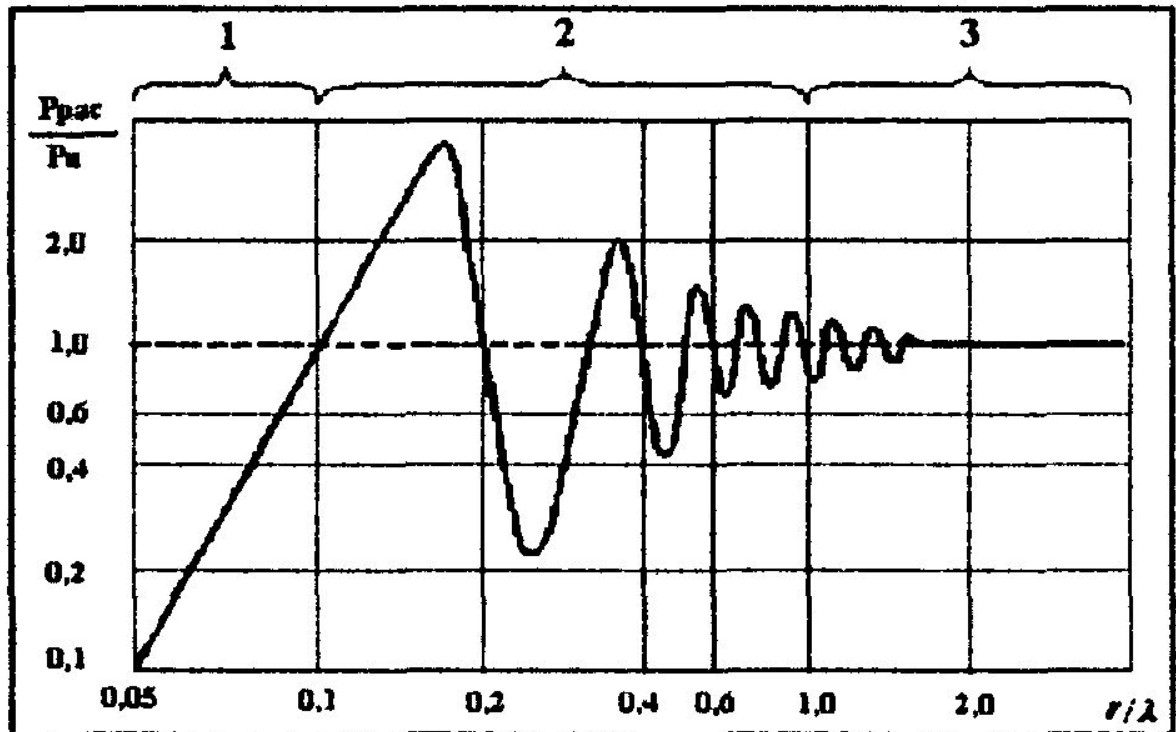
Результат решения электродинамической задачи - зависимость

$$P_{\text{рас}} / P_{\text{пад}} (r / \lambda)$$

1 - зона рефракции;

2 - зона резонансного рассеяния;

3 - зона отражения.



Определение ЭПР

ЭПР цели – это площадь поперечного сечения воображаемого объекта, помещенного в точку цели, который рассеивает всю падающую на него мощность изотропно и при этом создает у антенны РЛС ту же плотность потока мощности, что и реальная цель.

Типы целей:

- точечные;
- распределенные.

Способы определения ЭПР:

- теоретическое решение электродинамической задачи;
- измерение методом сравнения с объектом с известной ЭПР;
- измерение на физической модели;
- **Численный расчет с использованием возможностей современных ЭВМ**

ЭПР зависит от ориентации цели по отношению к направлению распространения радиоволны.

Расчет ЭПР


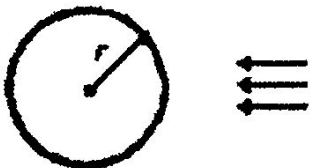
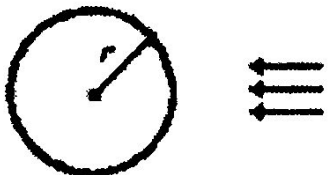
- Объекты, имеющие правильную геометрическую форму, являются элементарными точечными целями, поэтому их ЭПР можно вычислить теоретически в процессе решения электродинамической задачи рассеяния радиоволн. Обычно ЭПР представляется в виде зависимости от двух углов (α , β)

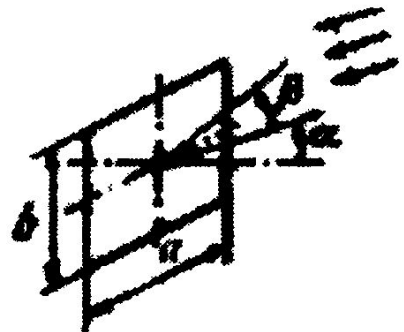
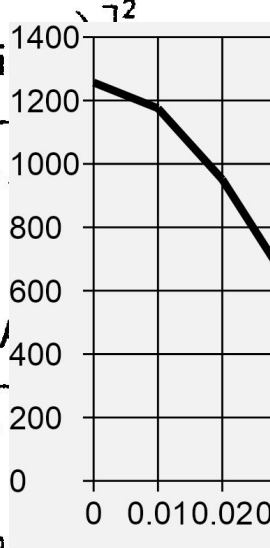
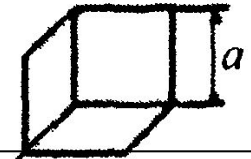
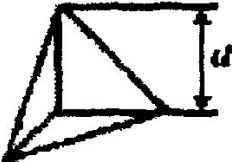
$$\sigma_{\text{ц}}(\alpha, \beta) = \sigma_{\text{ц max}} D_{\text{рас}}(\alpha, \beta),$$

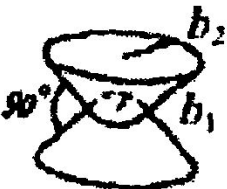
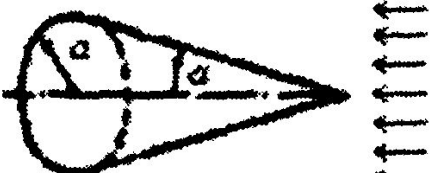

α и β - азимут и угол места цели из точки РЛС

$D_{\text{рас}}(\alpha, \beta)$ – диаграмма обратного рассеяния

ЭПР целей простейшей формы

Вид объекта	ЭПР
<p>Полуволновый вибратор</p> 	$\sigma_{\text{ц}}(\theta) = 0,86\lambda^2 \cos^4 \theta$ $\sigma_{\text{ц-max}}^- = 0,86\lambda^2$ $\sigma_{\text{ц ср}}^- \approx 0,17\lambda^2$
<p>Шар металлический</p> <p>$r \gg 2\lambda$ $r \ll 2\lambda$</p> 	$\sigma_{\text{ц}} = \pi r^2$ $\sigma_{\text{ц}} = 144\pi^5 r^6 / \lambda^4$
<p>Шар диэлектрический</p> <p>$r \gg 2\lambda$ $r \ll 2\lambda$</p> 	$\sigma_{\text{ц}}^- = \left(\frac{\sqrt{\epsilon' - 1}}{\sqrt{\epsilon' + 1}} \right)^2 \pi r^2$ $\sigma_{\text{ц}} = 64 \left(\frac{\sqrt{\epsilon' - 1}}{\sqrt{\epsilon' + 2}} \right)^2 \frac{\pi^6 r^6}{\lambda^4}$

Вид объекта	ЭПР
<p data-bbox="280 142 763 185">Прямоугольная пластина</p>  <p data-bbox="202 564 966 685">$\lambda = 10 \text{ см}, a = b = 1 \text{ м}$ $\sigma_{\text{ц}} = 1256 \text{ м}^2$ Резко падает при $\alpha, \beta \neq 0$</p>	$\sigma_{\text{ц}} = \frac{4\pi(ab)^2}{\lambda^2} \left[\frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} a \sin \alpha\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} a \sin \alpha} \right] \times \left[\frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} b \sin \beta\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} b \sin \beta} \right]$  <p data-bbox="1072 678 1468 728">$\sigma_{\text{ц max}} = 4\pi(ab)^2 \lambda$</p>
<p data-bbox="289 742 763 835">Угловый отражатель с прямоугольной гранью</p> 	$\sigma_{\text{ц max}} = 12\pi a^4 / \lambda^2$
<p data-bbox="309 1021 743 1106">Угловый отражатель с треугольной гранью</p> 	$\sigma_{\text{ц max}} = 4\pi a^4 / 3\lambda^2$ <p data-bbox="869 1163 1835 1278">$\lambda = 10 \text{ см}, a = 1 \text{ м}$ $\sigma_{\text{ц}} = 419 \text{ м}^2$ Слабо изменяется в широком диапазоне α</p>

Вид объекта	ЭПР
<p data-bbox="278 168 778 211">Биконический отражатель</p> 	$\sigma_{ц \max} = \frac{32\pi}{9\lambda} \left[b_2(2b_2 - b_1)^{1/2} - b_1^{3/2} \right]^2$ <p data-bbox="904 318 1779 415">Равномерная диаграмма рассеяния в плоскости, перпендикулярной его оси</p>
<p data-bbox="471 446 591 489">Конус</p> 	$\sigma_{ц \max} = \pi a^2 \operatorname{tg}^2 \alpha$ <p data-bbox="1112 525 1464 568">(вдоль оси конуса)</p>
<p data-bbox="394 701 681 743">Конус-цилиндр</p> 	$\sigma_{ц \sim} = \frac{4\pi^2 r^2}{(\pi + \alpha)^2} \times$ $\sin^2 \left(\frac{\pi^2}{\pi + \alpha} \right)$ $\times \frac{1}{\left[\cos \left(\frac{\pi^2}{\pi + \alpha} \right) - \cos \left(\frac{2\pi^2}{\pi + \alpha} \right) \right]^2}$

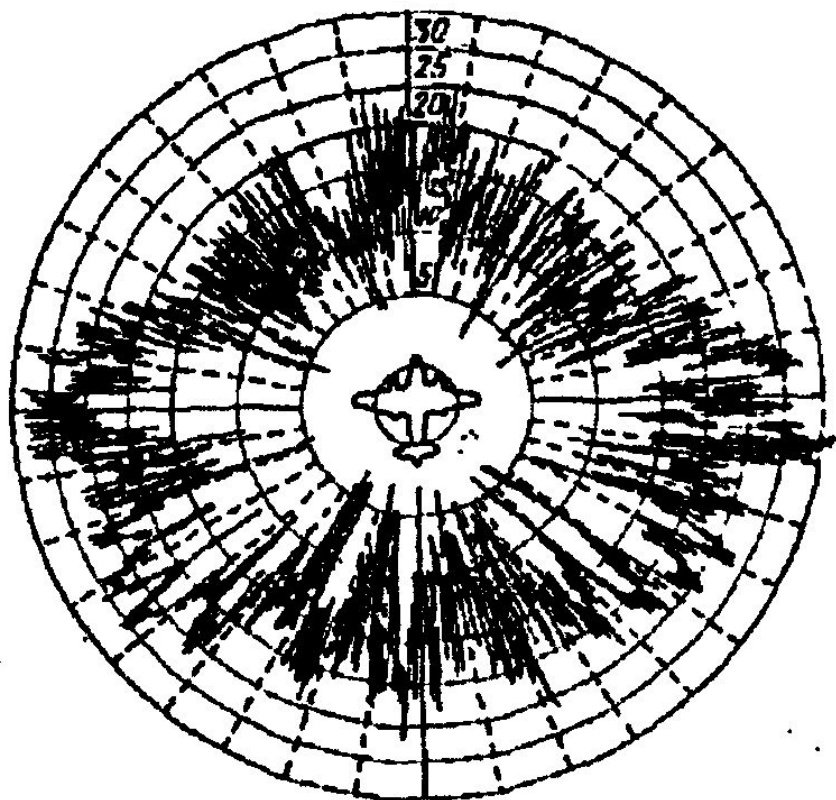
ЭПР некоторых целей

Цель	$\sigma_{ц}$ м ²
Истребитель	1,5–3
Бомбардировщик	4–25
Вертолет	1–3
Транспортный самолет	15–75
Самолет по технологии «Стелс»	0,1–1
Крылатая ракета	0,01–0,03
Катер	50
Рубка подводной лодки	30–140
Эсминец	1500
Крейсер	$> 10^4$
Автомобиль	5–20
Танк	7–30
Человек	0,5–1

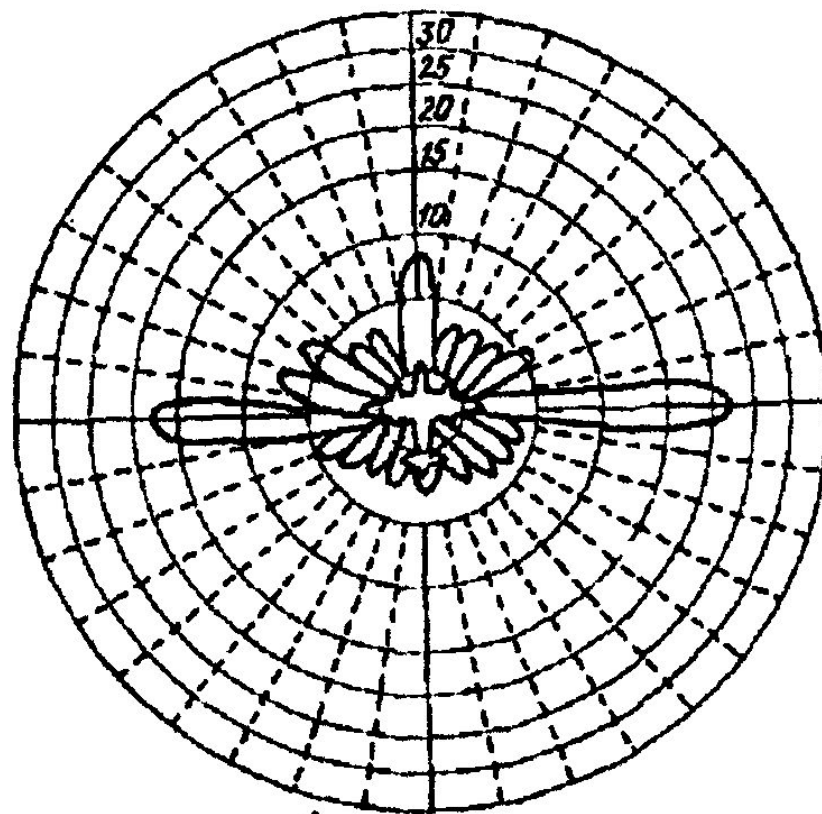
Таблица 7.2. Характеристики ЭПР и размеры наземных и морских целей ($\lambda = 3$ см)

Цель	ЭПР $\sigma_{ц}$, м ²	Размеры цели, м×м
Человек	0,5	0,5×0,5
Крылатая ракета на земле	1,0	3×0,8
Танк, БМП, САУ	4...20	8×4
Автомобиль	10...20	7×3
Истребитель на стоянке	3...15	12×17
Бомбардировщик на стоянке	20...150	50×40
Пусковая установка ракет	20...50	10×7
Подводная лодка на поверхности моря	10...200	300×30
Патрульный катер	300	52×8
Фрегат	$3 \cdot 10^3$	140×14
Эсминец	$3,5 \cdot 10^3$	170×17
Крейсер	$17 \cdot 10^3$	180×20
Десантный корабль	$30 \cdot 10^3$	260×30
Авианосец	$45 \cdot 10^3$	330×40

Реальная диаграмма обратного рассеяния самолета, $\sigma_{\Pi}(\alpha)$ [дБ м²]



$\lambda = 3$ см



$\lambda = 10$ см

Термин – «блестящая точка» – точка на отражающей поверхности, нормаль из которой совпадает с направлением на РЛС.

Задачи

2.1. Наземная радиолокационная станция, имеющая длину волны $\lambda = 10$ см, импульсную мощность $P_{\text{и}} = 1$ МВт, чувствительность приемника $P_{\text{пр мин}} = 10^{-13}$ Вт, эффективную площадь антенны $S_a = 15$ м², обнаруживает цель на расстоянии $D = 300$ км с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги. Определить эффективную отражающую площадь цели $\bar{\sigma}$.

2.2. РЛС обнаруживает четырехвинтовой пассажирский самолет на расстоянии $D_1 = 300$ км с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги. На каком расстоянии D_2 эта же РЛС обнаружит реактивный истребитель?

2.3. Найти количество $n_{\text{отр}}$ искусственных полуволновых отражателей, необходимое для подавления РЛС, наблюдающей реактивный бомбардировщик, при длине волны $\lambda = 3$ см и $\lambda = 10$ см. Исходить из условия, что подавление осуществляется при равенстве суммарной эффективной отражающей площади диполей и эффективной отражающей площади самолета. Расчет $\bar{\sigma}$ отражателя вести по формул $\bar{\sigma} \approx 0,17\lambda^2$

2.4. Найти радиус шара R , сторону квадратной пластины a , длину ребра углового отражателя b , имеющих эффективную отражающую площадь при $\lambda = 3$ см, равную эффективной отражающей площади крейсера.

Задачи

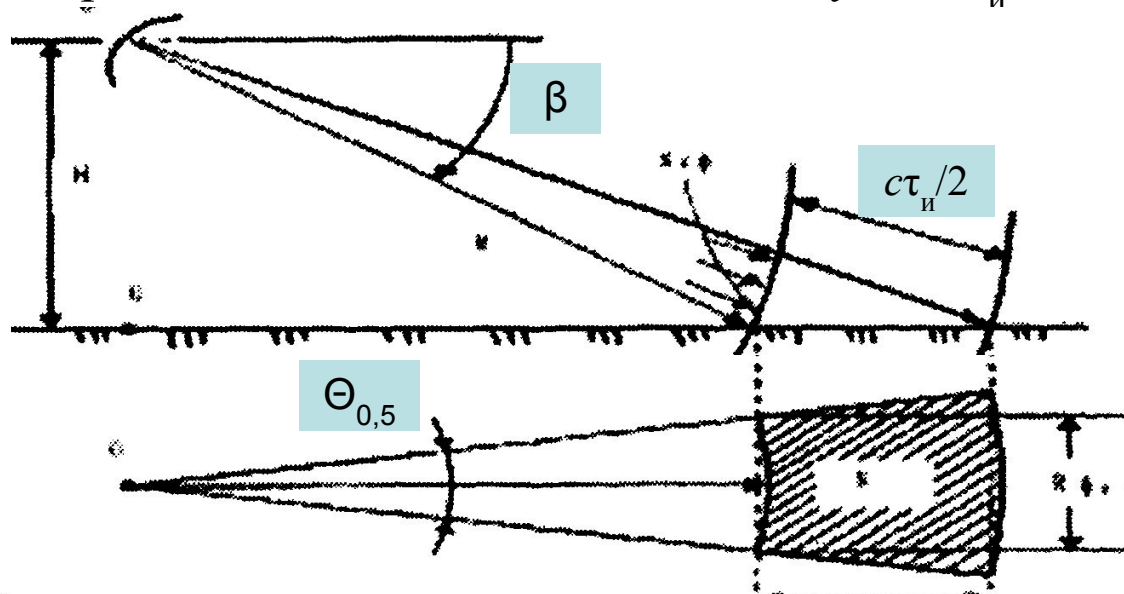
Среднее значение эффективной отражающей площади типовых целей

Наименование цели	$\bar{\sigma}$, м ²
Реактивный истребитель	5...8
Реактивный бомбардировщик	15...20
Большой четырехвинтовой пассажирский самолет	30...50
Большой реактивный пассажирский самолет	20...25
Крылатая ракета	0,3...0,8
Головка баллистической ракеты	1...10 ⁻³
Транспорт малого тоннажа (50...200 т)	50...250
Транспорт среднего тоннажа (1 000...10 000 т)	3 000...10 000
Транспорт большого тоннажа (>10 000 т)	>10 000
Траулер	750
Крейсер	14 000
Катер	100
Малая подводная лодка в надводном положении	140
Рубка подводной лодки	1
Человек	0,5...1,2

$\bar{\sigma}$

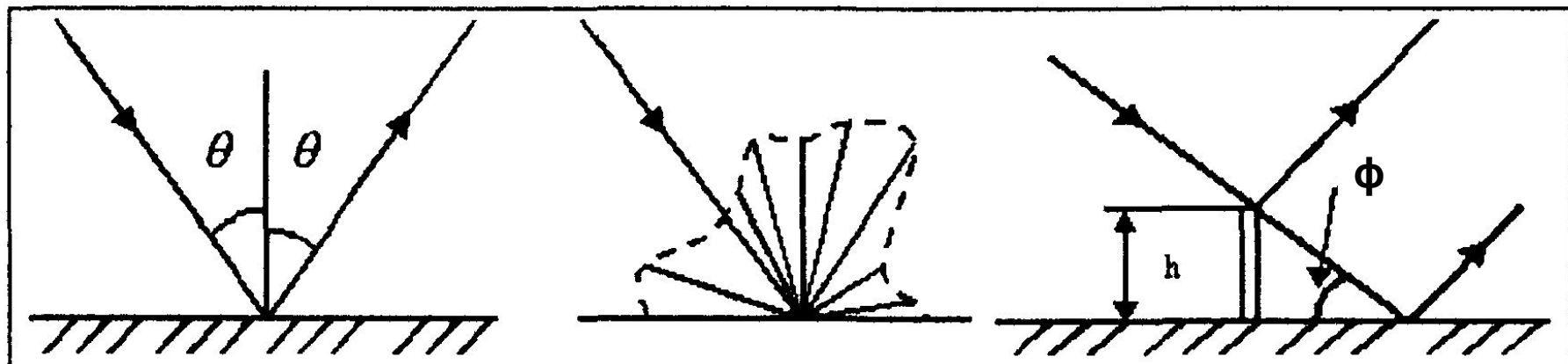
ЭПР протяженных целей

- Стандартный протяженный объект - поверхность Земли при облучении ее с помощью антенны, установленной на ЛА.
- При импульсном зондирующем сигнале на поверхности высвечивается пятно характерной формы, контуры которого образованы границей лепестка ДН (по уровню 0,5) и элемента разрешения по дальности, определяемого длительностью импульса $\tau_{и}$.



$\sigma_{ц}$, дБ (m^2/m^2)	Море	Бетонированная площадь	Степь	Травянистая поверхность	Лес
$\lambda = 3\text{см}$	- 40	- 30	- 20	- 16	- 15
$\lambda = 70\text{см}$	- 55	- 60	- 60	- 55	- 35

Типы рассеяния радиоволн



Зеркальное

Диффузное

От неровности высотой h

Условная граница зеркального и диффузного видов рассеяния определяется требованиями к неровностям поверхности: разность фаз сигналов, отраженных от основания и вершины неровности не должна превышать 45° для гладкой поверхности и может быть больше для шероховатой.

Относительная высота неровности h / λ не должна превышать $(16 \sin \phi)^{-1}$ для гладкой поверхности и может быть больше для шероховатой.

Противорадиолокационные покрытия

Области применения:

- безэховые камеры
- **снижение ЭПР летательных аппаратов и кораблей.**

Коэффициент отражения при нормальном падении плоской волны на границу воздух-покрытие равен

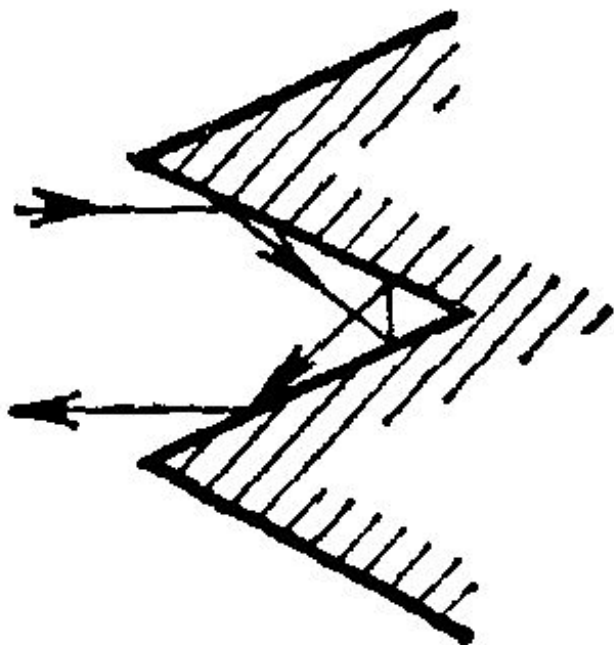
$$k_{\text{отр}} = \frac{\sqrt{\varepsilon/\mu} - 1}{\sqrt{\varepsilon/\mu} + 1}$$

для диэлектрического покрытия с относительными параметрами (ε , μ).

Обычно $\mu \approx 1$, и требуется реализовать $\varepsilon \rightarrow 1$.

Сделать самолет из воздуха?

Типичный материал – пенопластовый каркас с наполнителем-поглотителем, причем концентрация поглотителя должна возрастать с глубиной.

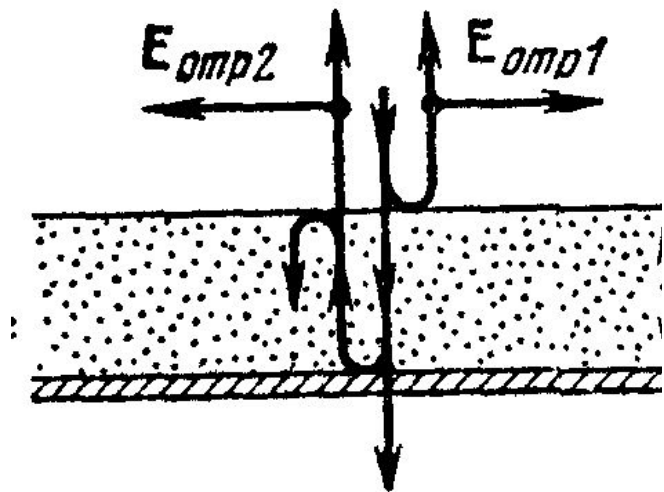


Радиопоглощающий материал формируется в виде пирамид с углом при вершине 30-60 град., что обеспечивает многократные отражения, каждое из которых связано с поглощением части энергии.

Можно обеспечить снижение коэффициента отражения до 20 дБ при высоте пирамид $(0,5 \dots 0,6) \lambda$.

Интерференционное покрытие толщиной $\lambda_{\epsilon, \mu} / 4$

Материал – пластмасса или каучук, наполненный порошком графита или карбонильного железа.



Стелс-технология

Стелс-технология (Stealth technology - *малозаметность*) — комплекс методов снижения заметности боевых машин в радиолокационном, инфракрасном и других областях спектра.

Методы:

- использование специальных геометрических форм планера самолёта,
- использование радиопоглощающих материалов и покрытий в конструкции планера и отсеков самолёта,
- экранирование компрессоров двигателей.

Проблемы:

- эффективны только в ДМВ и СМВ-диапазонах. Сделать объект малозаметным в метровом диапазоне, когда длина волны сравнима с собственными размерами объекта, в принципе невозможно.
- невозможно добиться полного поглощения радиоизлучения падающего на объект под произвольным углом. Главной целью при выборе формы является отражение волн «в сторону».

Стелс-технология

F-117 Night hawk (Lockheed, США)

Ночной ястреб



Стелс-технология

B-2 Spirit (Northrop, США)

Дух



Стелс-технология

Visby klass korvett (Kockums, Швеция)



Энергетический расчет РЛС в реальных условиях

Усложним модель энергетического расчета РЛС за счет учета дополнительных факторов, проявляющихся в реальных условиях.

Незначительные факторы:

- конечная крутизна ДН – коэффициент 0,5.
- коэффициент передачи АФУ $\eta = 0,9 \dots 0,95$, $\eta^2 = 0,8 \dots 0,9$;
- неоптимальность алгоритмов обработки сигнала – $q_{\text{пор}} > q_{\text{пор опт}}$

Более существенные и трудно определяемые факторы:

- влияние атмосферы;
- влияние подстилающей поверхности.

Эти факторы учитываются коэффициентом $1/L_{\text{доп}}$ под корнем.

Фактор, не связанный с энергетикой:

- дальность радиовидимости.

Влияние атмосферы на дальность действия РЛС

Свободное пространство → реальная атмосфера

Существенные явления в атмосфере:

- поглощение (приводит к дополнительному затуханию);
- рассеяние (приводит к дополнительному затуханию);
- рефракция (приводит к погрешности измерения высоты и дальности, но и к увеличению дальности радиогоризонта).

Поглощение радиоволн в атмосфере

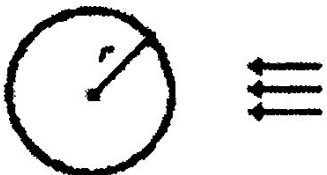
- **Нерезонансное** (газы) - вызывается затратой энергии ЭМП на преодоление сил трения между молекулами атмосферных газов при вынужденном колебательном движении молекул под действием поля.
- **Резонансное** (газы) - связано с наличием квантовых свойств молекул атмосферных газов: поглощаются только свои собственные наборы квантов энергии или соответствующие им наборы (спектры) частот. В результате молекула переходит в более высокое энергетическое состояние. В радиодиапазоне эффективно поглощают только молекулы кислорода и молекулы водяного пара:

$$\lambda_{\text{кисл}} = 0,25 \text{ см и } 0,5 \text{ см}, \quad \lambda_{\text{в.п.}} = 0,17 \text{ см и } 1,35 \text{ см};$$

- Поглощение **гидрометеорами** и **твердыми частицами**.

Рассеяние радиоволн в атмосфере

- на **каплях дождя и тумана**. ЭПР капли и, следовательно, интенсивность рассеяния пропорциональна f^4 при $2\pi r_k \ll \lambda$.

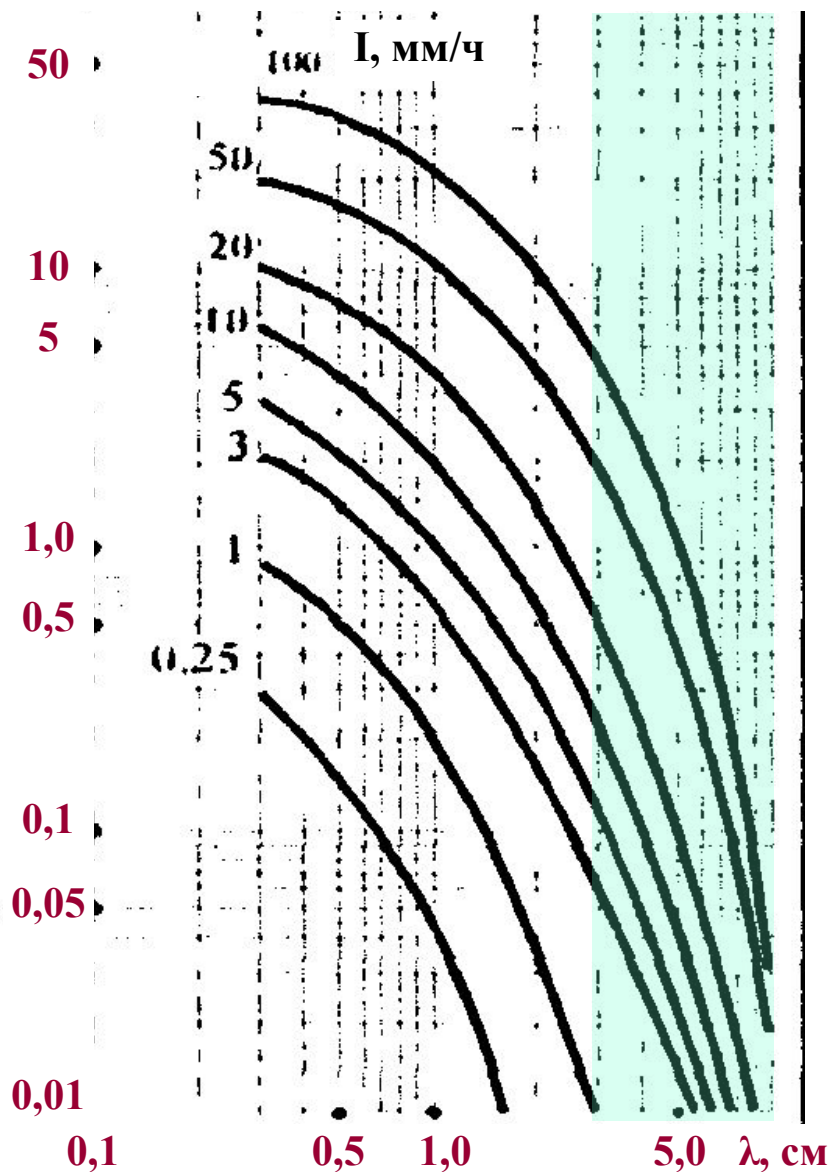
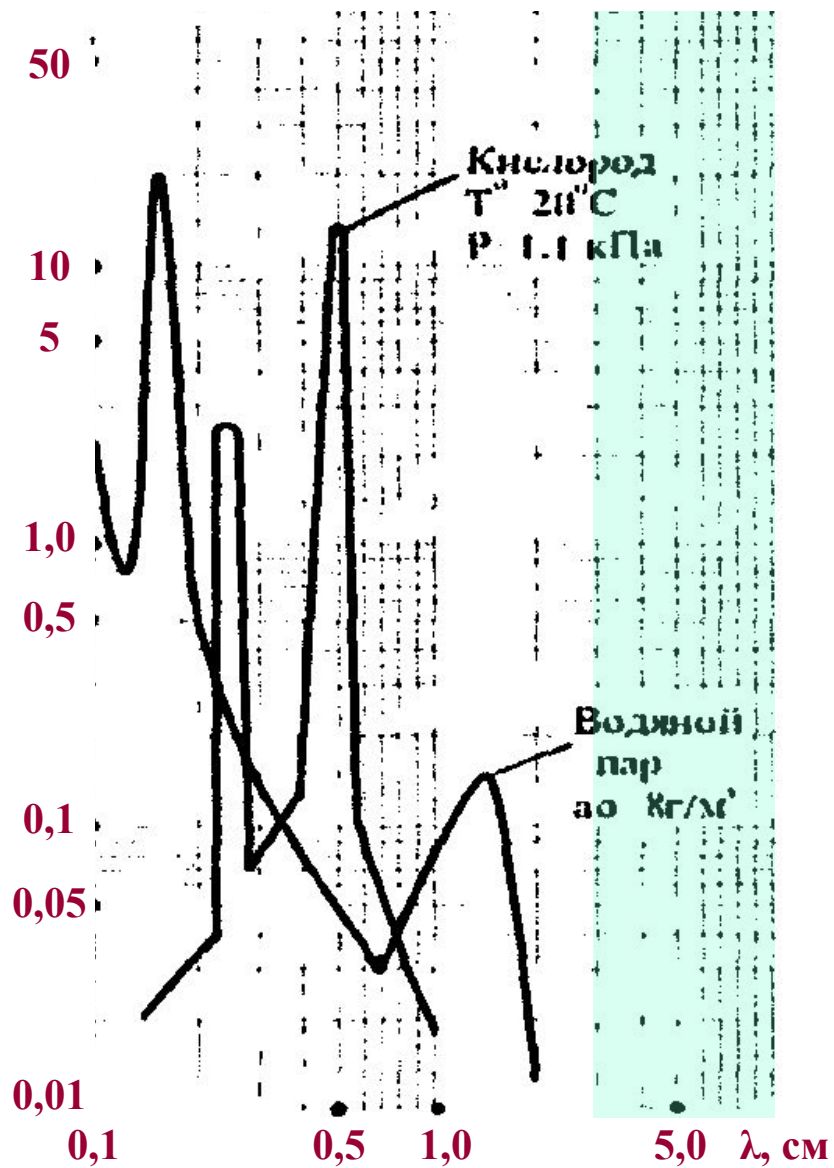
<p>Шар диэлектрический</p> <p>$r \gg 2\lambda$ $r \ll 2\lambda$</p> 	$\sigma_{ц} = \left(\frac{\sqrt{\epsilon' - 1}}{\sqrt{\epsilon' + 1}} \right)^2 \pi r^2$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px; background-color: #e0f0ff;"> $\sigma_{ц} = 64 \left(\frac{\sqrt{\epsilon' - 1}}{\sqrt{\epsilon' + 2}} \right)^2 \frac{\pi^6 r^6}{\lambda^4}$ </div>
---	--

Диаметр каплей при дожде средней интенсивности обычно составляет 0,5–1,5 мм. (В действительности форма капли отличается от шара!)

При сильном дожде встречаются капли диаметром около 2,5 мм.

Коэффициент затухания α_3 [дБ/км] для поглощения и рассеяния приводится в таблицах (графиках) в зависимости от интенсивности дождя I и длины волны λ .

Коэффициенты затухания α_3 [Дб/км] при поглощении и рассеянии радиоволн в атмосфере



Например, частота 10 ГГц при интенсивности дождя $I = 3$ мм/час

Кислород: $\alpha_3 \approx 0$ дБ/км

Водяной пар: $\alpha_3 \approx 0$ дБ/км

Дождь: $\alpha_3 = 0,05$ дБ/км

Общее затухание: $\alpha_3 = 0,05$ дБ/км $\rightarrow \alpha_3 = 10^{0,005} = 1,011$ [1/км]

При дальности до цели $R = 100$ км $L_{\text{доп}} = 10$ дБ или 10 раз
(туда и обратно).

$$P_{\text{с мин}} = \{\square\} / R_{\text{макс } 0}^4 \text{ - св.пр-во}$$

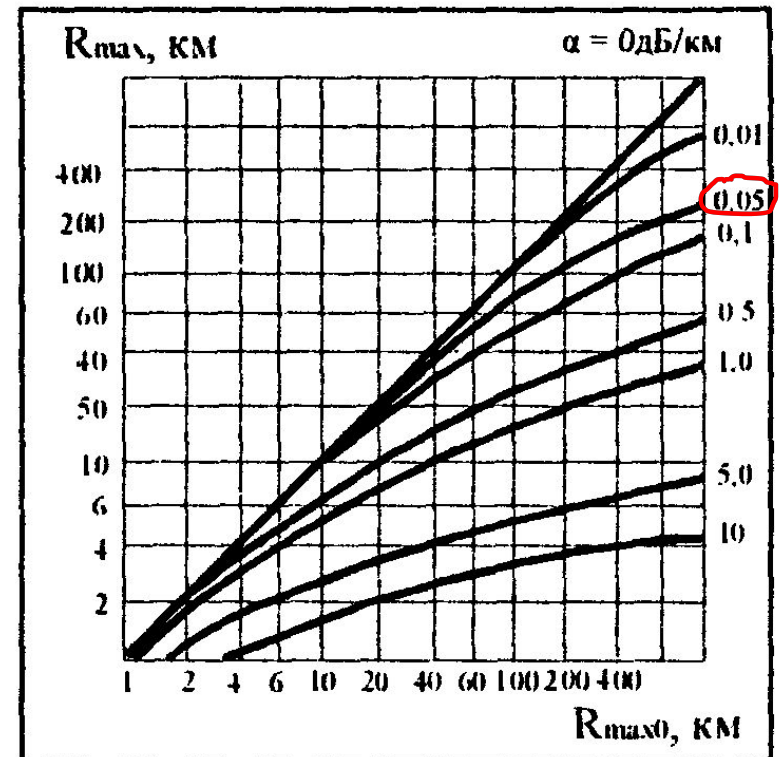
$$P_{\text{с мин}} = \{\square\} / 2\alpha_3 R_{\text{макс}}^5 \text{ - атмосфера}$$

$$R_{\text{макс}} = (R_{\text{макс } 0}^4 / 2\alpha_3)^{1/5} \quad \alpha_3 \text{ [1/км]}$$

$$-0,05 \alpha_3 R_{\text{макс } 0}$$

$$R_{\text{макс}} = R_{\text{макс } 0} 10 \quad \text{[дБ/км]}$$

Дождь может идти не на всей длине трассы



Рефракция радиоволн в атмосфере

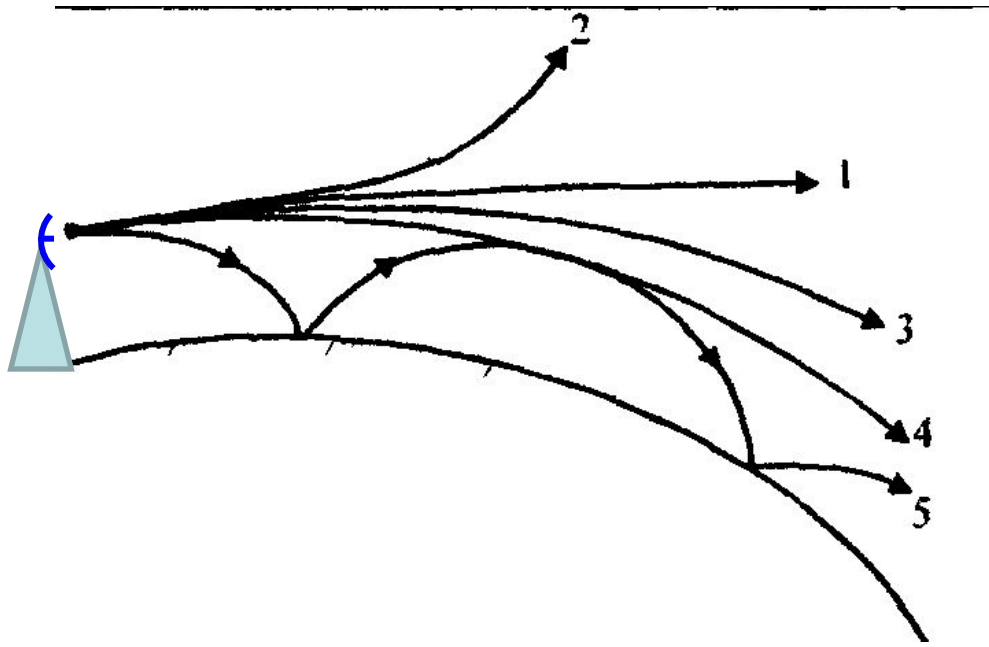
Рефракция – отклонение от прямолинейного распространения радиоволн в среде с изменяющимися (в пространстве!) электрическими параметрами.

Диэлектрическая проницаемость атмосферы – ϵ_a (зависит от давления, температуры и влажности воздуха) изменяется с высотой H .

Коэффициент преломления – $n_a = \sqrt{\epsilon_a}$

$\text{var } \epsilon_a \rightarrow \text{var } n_a \rightarrow$ искривление траектории

Градиент коэффициента преломления по высоте $g_n = dn_a / dH$ определяет тип рефракции.



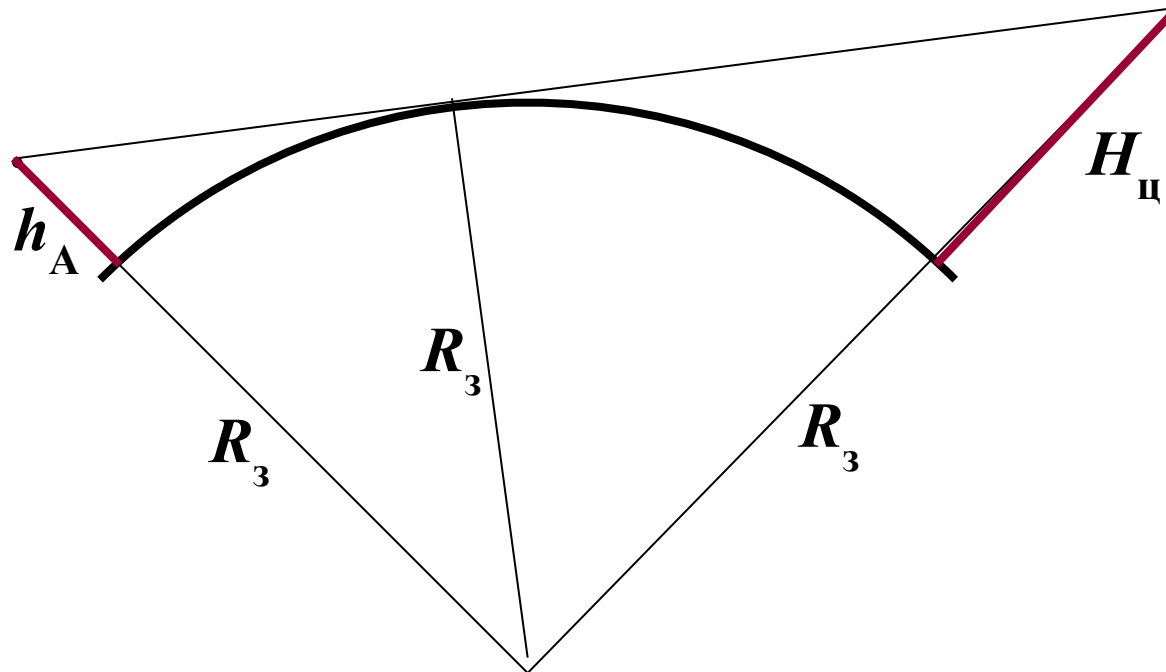
- $g_n = 0$ – рефракция отсутствует, траектория прямолинейна (1);
- $g_n > 0$ – отрицательная рефракция, траектория отклоняется вверх (2);
- $g_n < 0$ – положительная рефракция, траектория отклоняется вниз (3);

Понятие «нормальная атмосфера» – $g_n = -4 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$

В нормальной атмосфере рефракция положительна, что ведет к увеличению дальности *радиогоризонта*.

- $g_n = -1,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ – критическая рефракция, траектория радиоволн круговая относительно центра Земли (4);
- $g_n < -1,57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$ – сверхрефракция (5): из-за инверсного изменения влажности и температуры в приповерхностном слое возникают *атмосферные волноводы*.

Дальность радиовидимости, радиогоризонт



*Нормальная
атмосфера*

$$D_{\text{PB}} [\text{км}] \approx 3,57 \cdot (\sqrt{h_A} [\text{м}] + \sqrt{H_{\text{ц}}} [\text{м}])$$

$$R_3 = 6380 \text{ км}$$

$$D_{\text{PT}} [\text{км}] \approx 4,12 \cdot (\sqrt{h_A} [\text{м}] + \sqrt{H_{\text{ц}}} [\text{м}]),$$

$$R_{3 \text{ экв}} = (4/3) R_3$$

Влияние подстилающей поверхности («загоризонтная» РЛ)

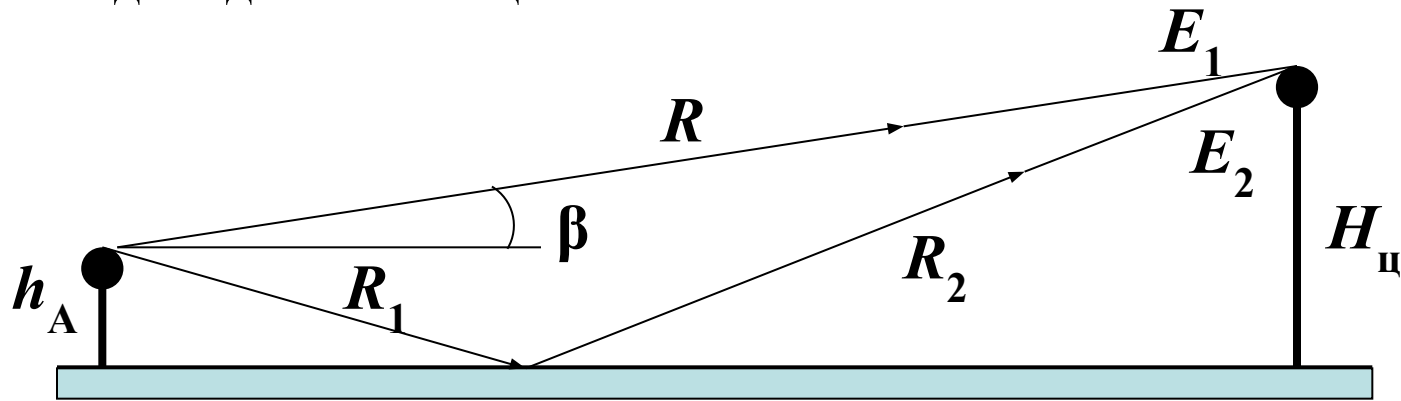
- Влияние подстилающей поверхности проявляется в РЛС, работающих на «*поверхностной волне*». В этом случае происходит огибание радиоволнами земной поверхности за счет явления дифракции радиоволн. **Это не СВЧ!**
- Проблема – потери в подстилающей поверхности, возрастающие с частотой.
- Дальность действия порядка 1000 км можно обеспечить только на частотах ниже 300 кГц.
- Затухание поверхностной волны зависит от
 - $\epsilon_{\text{п}}$ = 5 ... 80 (песчаная пустыня ... морская вода);
 - $\sigma_{\text{п}}$ = 0,0001 ... 5 См/м. При уменьшении проводимости грунта радиоволны глубже проникают в среду и, следовательно, возрастает их поглощение. Еще А.С. Попов заметил, что над поверхностью моря дальность радиосвязи увеличивается по сравнению с дальностью связи над сушей.

Влияние отражения радиоволн ионосферой («загоризонтная» РЛ)

- Радиоволны, достигающие приемной антенны после отражения ионосферой, называются *пространственными*.
- На пространственных волнах возможно *сверхдальнее радиолокационное обнаружение* (эффект Кабанова, 1947 г.), например ядерных взрывов, запусков ракет.
- *Загоризонтные* РЛС работают в основном в диапазоне *коротких волн* ($\lambda=10 \dots 15$ м).
- Расчет дальности действия затруднен из-за нестационарности процессов, влияющих на распространение, рассеяние и поглощение радиоволн.

Влияние отражения радиоволн от земной поверхности («низколетящая цель»)

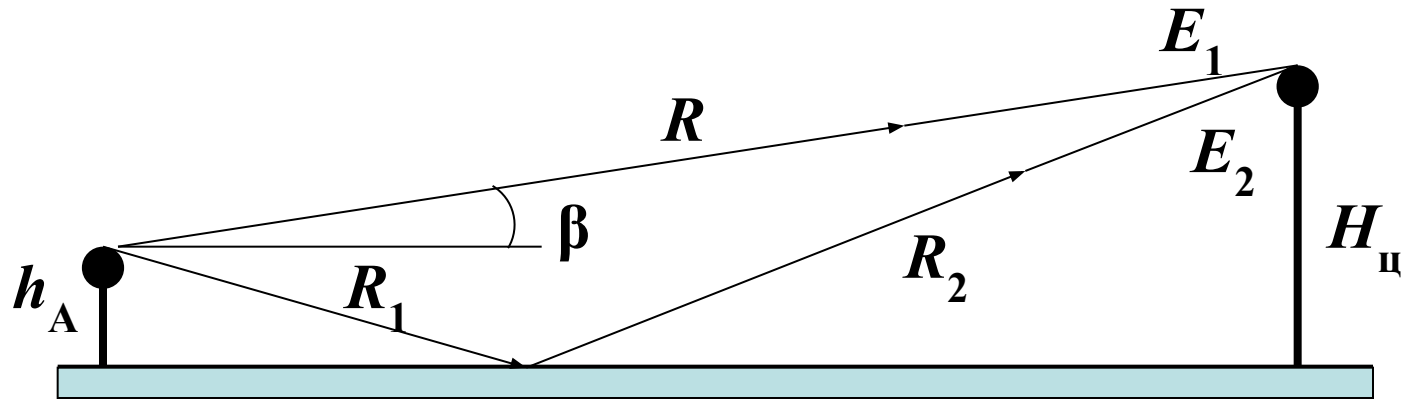
Радиоволна, отраженная земной поверхностью, интерферирует с прямой волной дважды: в точке цели и в точке РЛС.



Модель: зеркально отражающая поверхность (спокойная вода) и расстояние до цели намного меньше дальности радиогоризонта (поверхность Земли можно считать плоской). Для низколетящей цели угол β мал и, следовательно, амплитуды прямой и отраженной волн примерно равны.

Введем интерференционный множитель:

$$F_0 = \frac{E_1 + E_2}{E_1} = 2 \sin \frac{2\pi h_A H_{ц}}{\lambda R \cos \beta}$$



С учетом интерференционного множителя результирующий коэффициент усиления антенны $G_p = F_0^2 G_A$ и уравнение максимальной дальности примет вид:

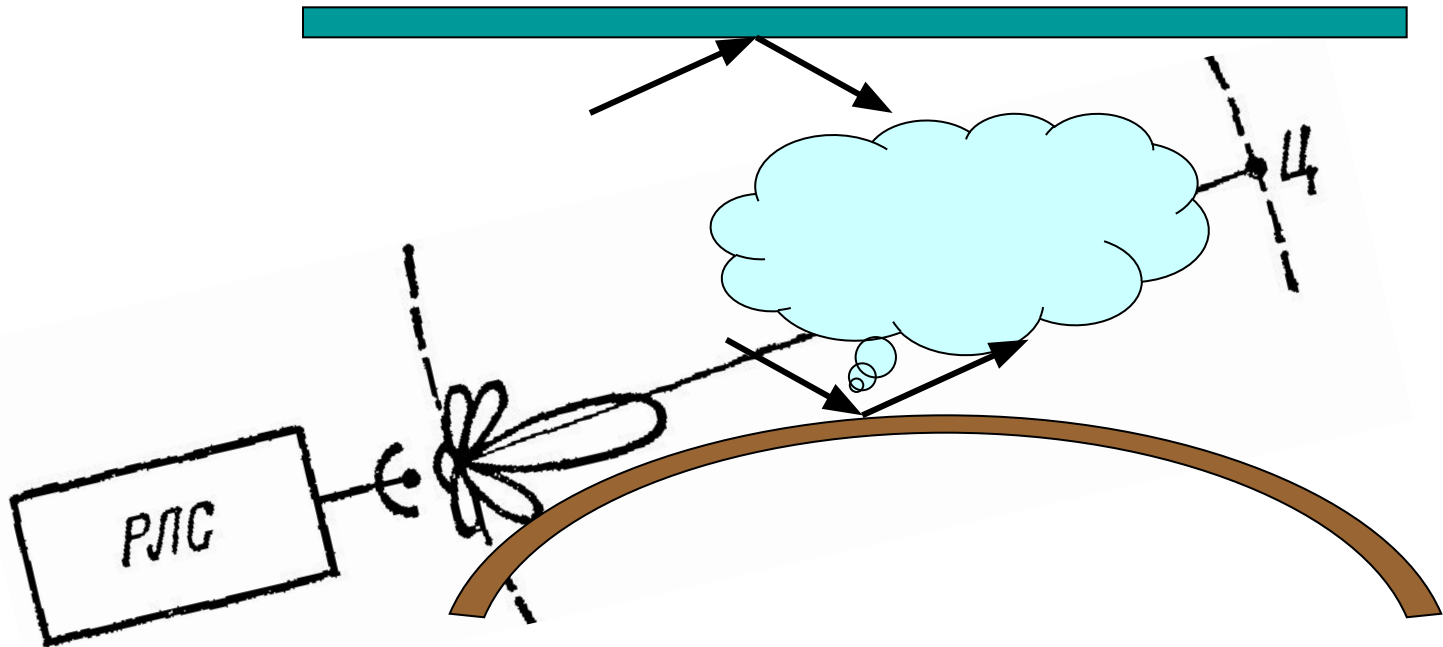
$$R_{\text{макс}} = F_0 \sqrt[4]{\frac{2E_{\text{и}} G_A^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi) q_{\text{пор}}^2 kT_{\text{ш}}}}$$

При обнаружении низколетящих целей $D \gg H_{\text{ц}}$, угол β мал и:

$$F_0 \approx \frac{4\pi h_A H_{\text{ц}}}{\lambda R}, \quad R_{\text{макс}} = \sqrt[8]{\frac{8\pi E_{\text{и}} G_A^2 \sigma_{\text{ц}} h_A^4 H_{\text{ц}}^4}{\lambda^2 q_{\text{пор}}^2 kT_{\text{ш}}}}$$

Низколетящую цель очень трудно обнаружить!

Итоги оценки дальности действия РЛС



1. Расчет в свободном пространстве
2. Учет сферичности Земли (радиогоризонт)
3. Влияние атмосферы: поглощение, рассеяние, рефракция в диапазоне СВЧ, отражение от ионосферы в диапазоне КВ
4. Влияние подстилающей поверхности: отражение от поверхности в диапазоне СВЧ, затухание в подстилающей поверхности в диапазоне КВ, СВ