

# Энергетический расчет РЛС

Цель расчета – определение отношения сигнал/помеха и(или) сигнал/шум  $h$  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.

Тогда отношение сигнал/шум естественно определить как отношение амплитуды отраженного импульса к среднеквадратическому значению шума  $h = U_c / \sigma_{ш}$ .

Возможны и используются другие определения отношения сигнал/шум.

Выбор параметров РЛС должен обеспечить выполнение условия:  $h \geq h_{пор}$ ,

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

## Допущения:

- свободное пространство (не учитывается поглощение в атмосфере и влияние подстилающей поверхности);
- цель – точечная.



## Расчет:

Плотность потока мощности прямой волны в точке цели

$$\Pi_{\text{ц}} = \frac{R_{\text{ПРД}}}{4\pi R^2} G_A$$

## Модель переизлучения:

- прием падающей радиоволны на эквивалентную антенну, характеризующуюся площадью  $\sigma_{\text{ц}}$  [м<sup>2</sup>];
- изотропное излучение всей принятой мощности.

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

Понятие ЭПР будет рассмотрено позднее.

Мощность «принятая» целью равна

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

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)

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

Условие  $h \geq h_{\text{пор}}$  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  $\tau_{\text{и}}$ ;

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

$\Delta f$  – ширина полосы приемника,  $r$  – входное сопротивление.

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

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

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

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

и, соответственно,

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

при условии  $\Delta f = 2/\tau_{\text{и}}$ .

При проектировании РЛС применяется системный подход

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

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, 500 Гц (диап. 48, 96 миль)

Частота - 9415±30 МГц (X-band)

Промежуточная частота - 60 МГц

Шум – 6 Дб



# Энергетический расчет реальной РЛС

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

- $P_c = 50$  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)
- $\sigma_{\text{ц}} = 300$  м<sup>2</sup> (небольшое судно)
- $h_{\text{пор}} = 3$
- $T_{\text{ш}} = 1200$  К

Получим  $R_{\text{макс}} \approx 220$  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.

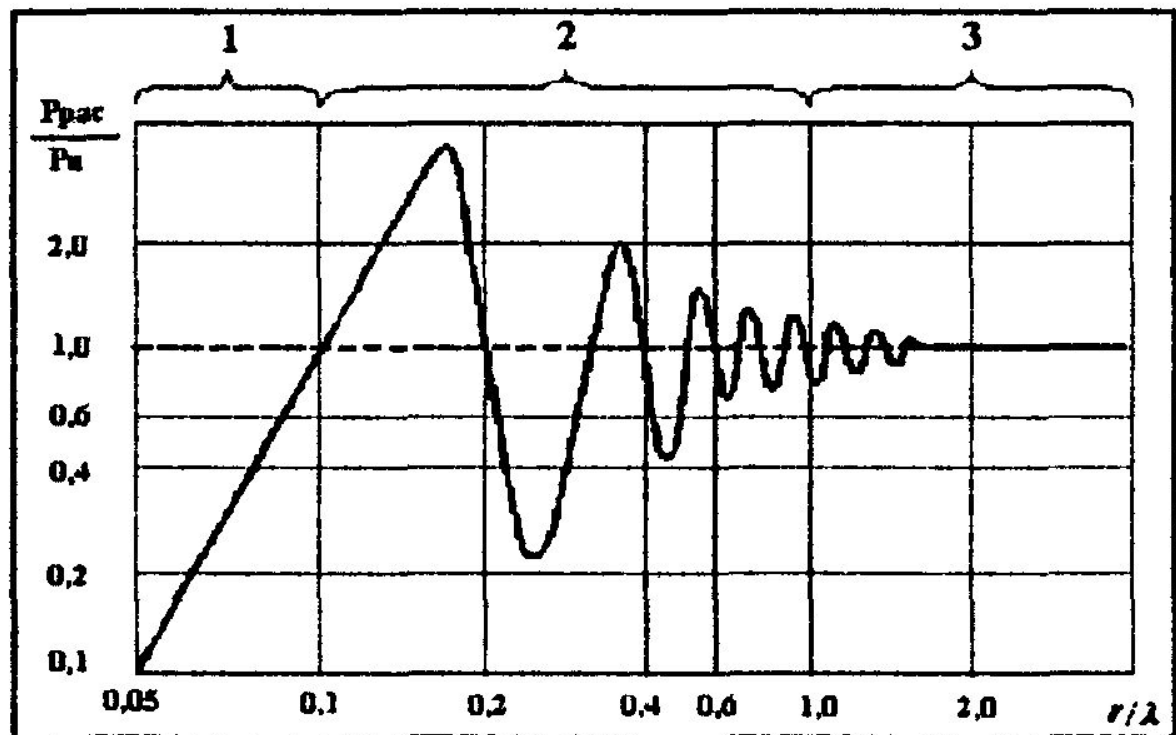
Результат решения электродинамической задачи - зависимость

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

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  $(\alpha, \beta)$


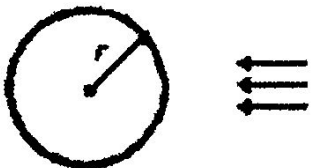
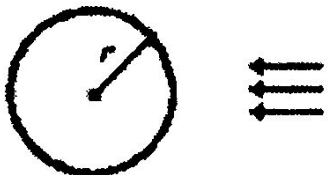
$$\sigma_{\text{ц}}(\alpha, \beta) = \sigma_{\text{ц max}} D_{\text{рас}}(\alpha, \beta),$$

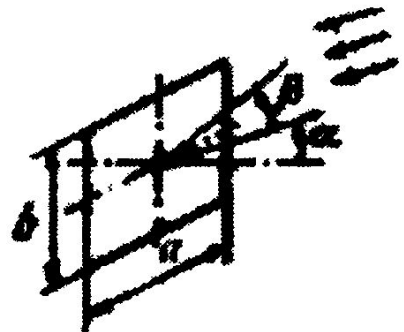
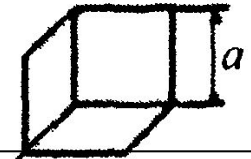

$\alpha$  и  $\beta$  - азимут и угол места цели из точки РЛС

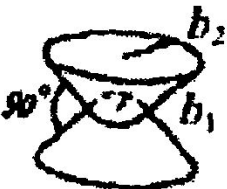
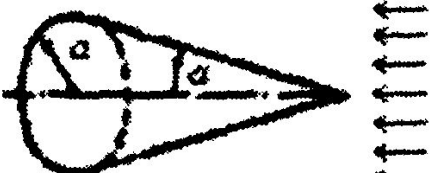

$D_{\text{рас}}(\alpha, \beta)$  – диаграмма обратного рассеяния

Ранее использовалось обозначение  $\beta$  и  $\varepsilon$  - азимут и угол места

# ЭПР целей простейшей формы

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

Вид объекта	ЭПР
<p data-bbox="280 142 763 185">Прямоугольная пластина</p>  <p data-bbox="202 564 966 621"><math>\lambda = 10 \text{ см}, a = b = 1 \text{ м} \quad \sigma_{\text{ц}} = 1256 \text{ м}^2</math></p> <p data-bbox="202 628 772 678">Резко падает при <math>\alpha, \beta \neq 0</math></p>	$\sigma_{\text{ц}} = \frac{4\pi(ab)^2}{\lambda^2} \left[ \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} a \sin \alpha\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} a \sin \alpha} \right]^2 \times$ $\times \left[ \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} b \sin \beta\right)}{\frac{2\pi}{\lambda} b \sin \beta} \right]^2$ $\sigma_{\text{ц max}} = 4\pi(ab)^2 \lambda^{-2}$
<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 1564 1220"><math>\lambda = 10 \text{ см}, a = 1 \text{ м} \quad \sigma_{\text{ц}} = 419 \text{ м}^2</math></p> <p data-bbox="869 1228 1835 1278">Слабо изменяется в широком диапазоне <math>\alpha</math></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

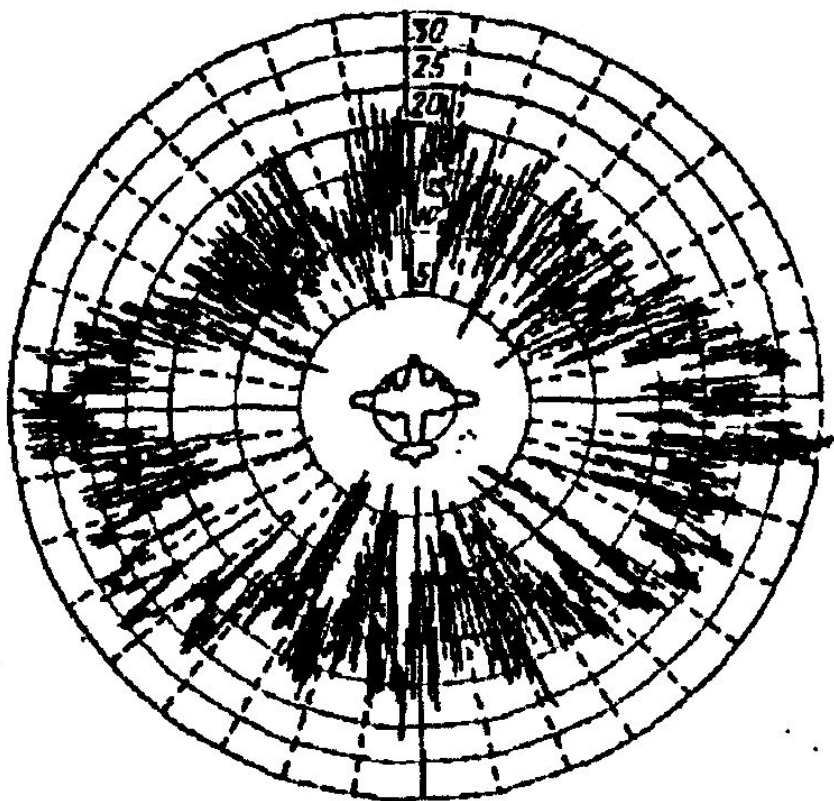
Цель	$\sigma_{ц}$ м <sup>2</sup>
Истребитель	1,5–3
Бомбардировщик	4–25
Вертолет	1–3
Транспортный самолет	15–75
Самолет по технологии «Стелс»	0,1–1
Крылатая ракета	0,01–0,03
Катер	50
Рубка подводной лодки	30–140
Эсминец	1500
Крейсер	$> 10^4$
Автомобиль	5–20
Танк	7–30
Человек	0,5–1

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

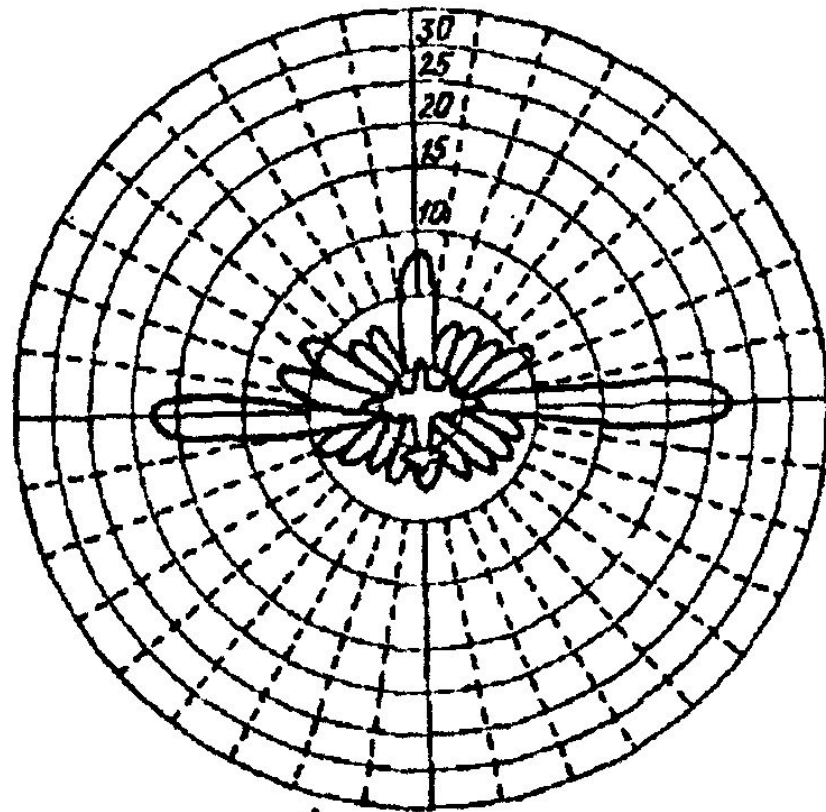
Цель	ЭПР $\sigma_{ц}$ , м <sup>2</sup>	Размеры цели, м×м
Человек	0,5	0,5×0,5
Крылатая ракета на земле	1,0	3×0,8
Танк, БМП, САУ	4...20	8×4
Автомобиль	10...20	7×3
Истребитель на стоянке	3...15	12×17
Бомбардировщик на стоянке	20...150	50×40
Пусковая установка ракет	20...50	10×7
Подводная лодка на поверхности 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 м<sup>2</sup>]



$\lambda = 3$  см



$\lambda = 10$  см

## 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  $S_a = 15$  м<sup>2</sup>, 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

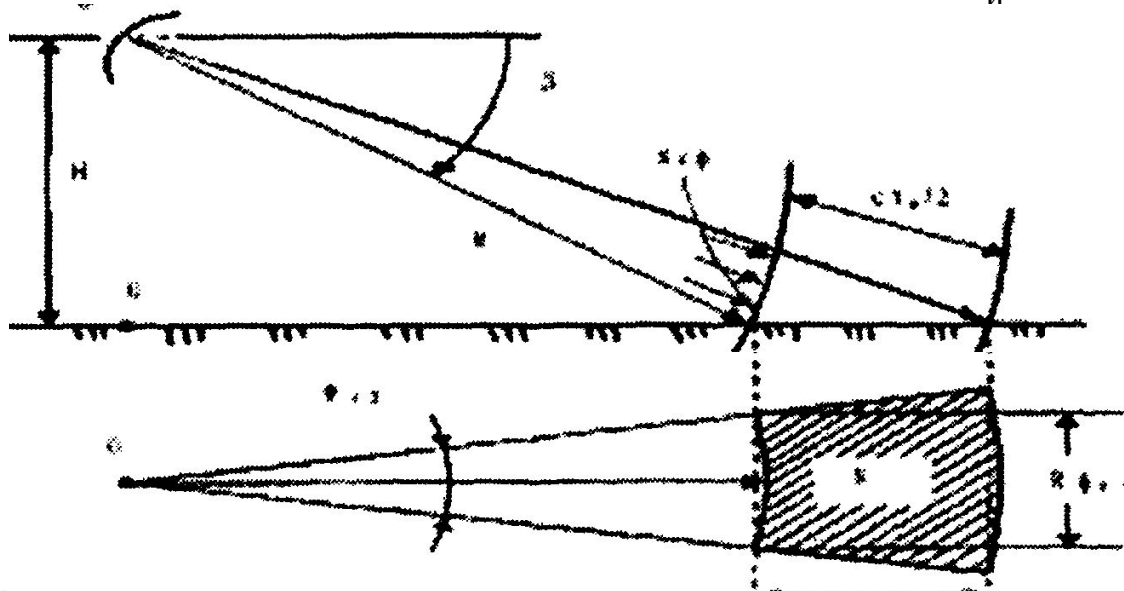
## Среднее значение эффективной отражающей площади типовых целей

Наименование цели	$\bar{\sigma}$ , м <sup>2</sup>
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 <sup>-3</sup>
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

σ,

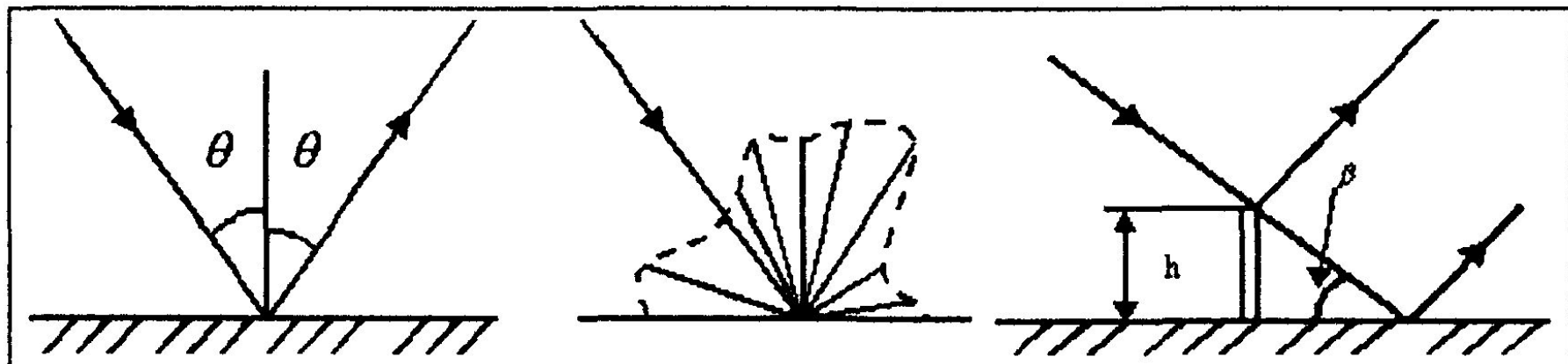
# ЭПР протяженных целей

- 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  $45^\circ$  для гладкой поверхности и может быть больше для шероховатой. Относительная высота неровности  $h / \lambda$  не должна превышать  $(16 \sin \theta)^{-1}$  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

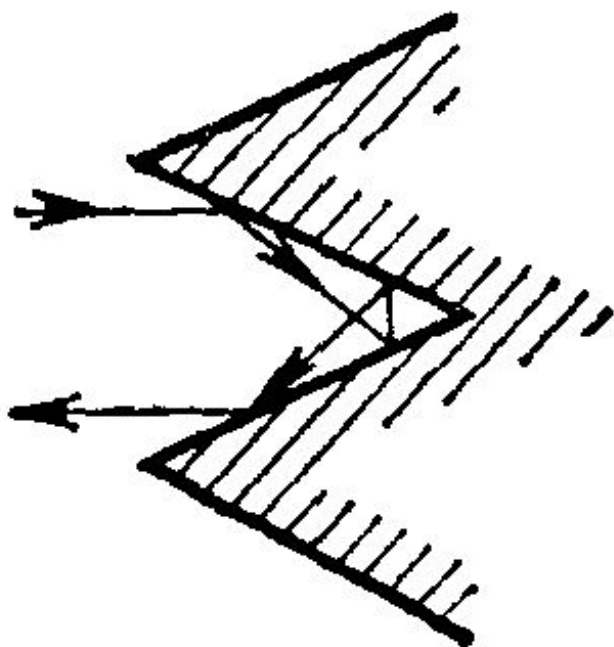
$$k_{\text{отр}} = \frac{\sqrt{\varepsilon/\mu} - 1}{\sqrt{\varepsilon/\mu} + 1}$$

для диэлектрического покрытия с относительными параметрами ( $\varepsilon$ ,  $\mu$ ).

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

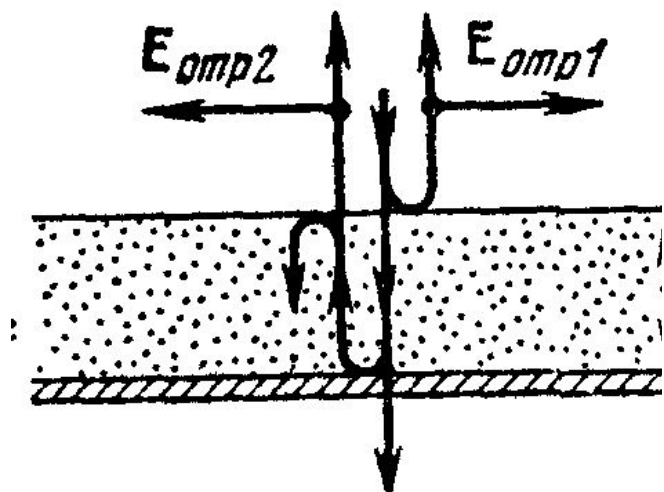
Сделать самолет из воздуха?

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.

Для снижения коэффициента отражения на 20 дБ высота пирамид должна быть  $(0,5 \dots 0,6) \lambda$ .



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

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

# Стелс-технология

Стелс-технология (Stealth technology) — 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)



# Стелс-технология

B-2 Spirit (Northrop, США)



# Стелс-технология

Visby klass korvett (Kockums, Швеция)



# Энергетический расчет РЛС в реальных условиях

Какие **еще** факторы необходимо учесть при энергетическом расчете РЛС в реальных условиях?

- 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;
- **Что еще?**

Другие 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

Существенные явления:

- 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 и рассеяние радиоволн в атмосфере

## Поглощение:

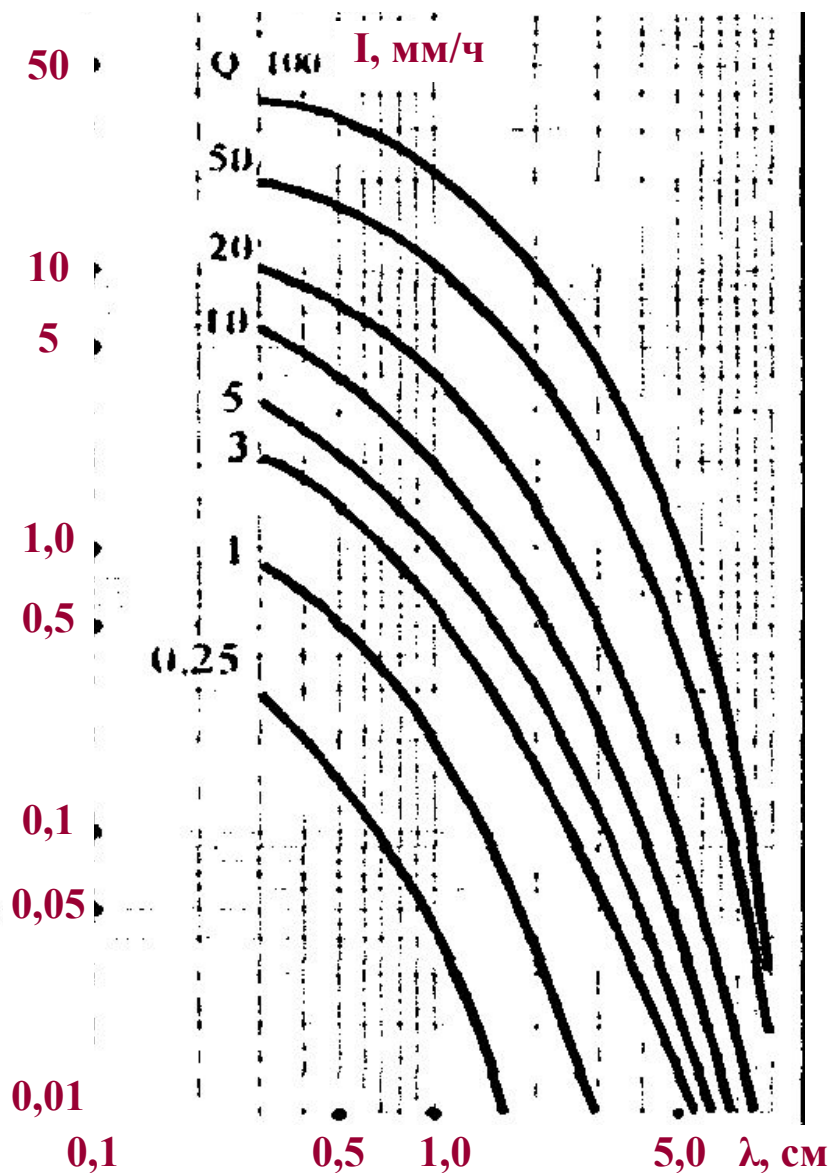
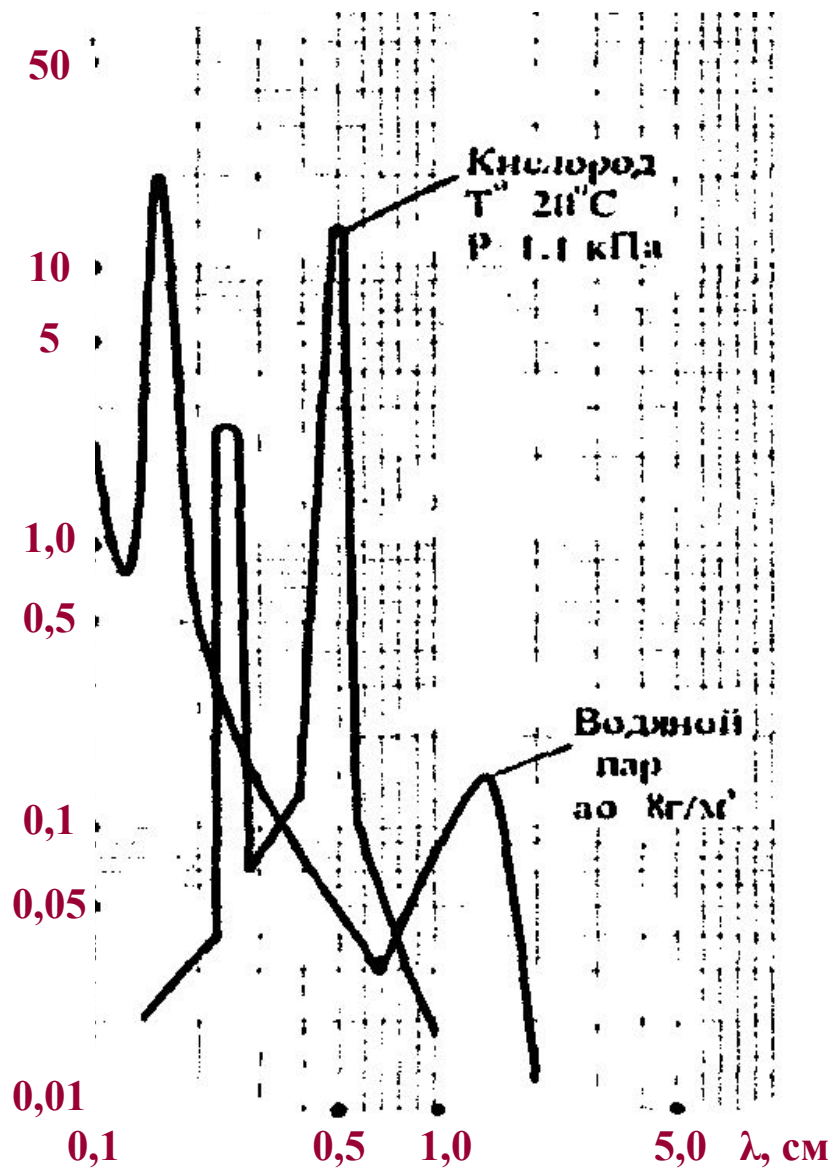
- **молекулами кислорода и молекулами водяного пара** на частотах близких к резонансным:  $\lambda_{\text{кисл}} = 0,25 \text{ см}$  и  $0,5 \text{ см}$ ,  $\lambda_{\text{в.п.}} = 0,17 \text{ см}$  и  $1,35 \text{ см}$ ; (резонансные линии других атмосферных газов расположены за пределами радиодиапазона);
- **гидрометеорами** и твердыми частицами.

## Рассеяние:

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

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

# Коэффициенты затухания $\alpha_3$ [Дб/км] при поглощении и рассеянии радиоволн в атмосфере



Например, частота 10 ГГц при интенсивности дождя  $I = 5$  мм/час

Кислород:  $\alpha_3 \approx 0$  дБ/км

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

Дождь:  $\alpha_3 = 0,1$  дБ/км

Общее затухание:  $\alpha_3 = 0,1$  дБ/км  $\rightarrow \alpha_3 = 10^{0,01} = 1,023$  [1/км]

При дальности до цели  $R = 100$  км  $L_{\text{доп}} = 20$  дБ или 100 раз (туда и обратно).

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

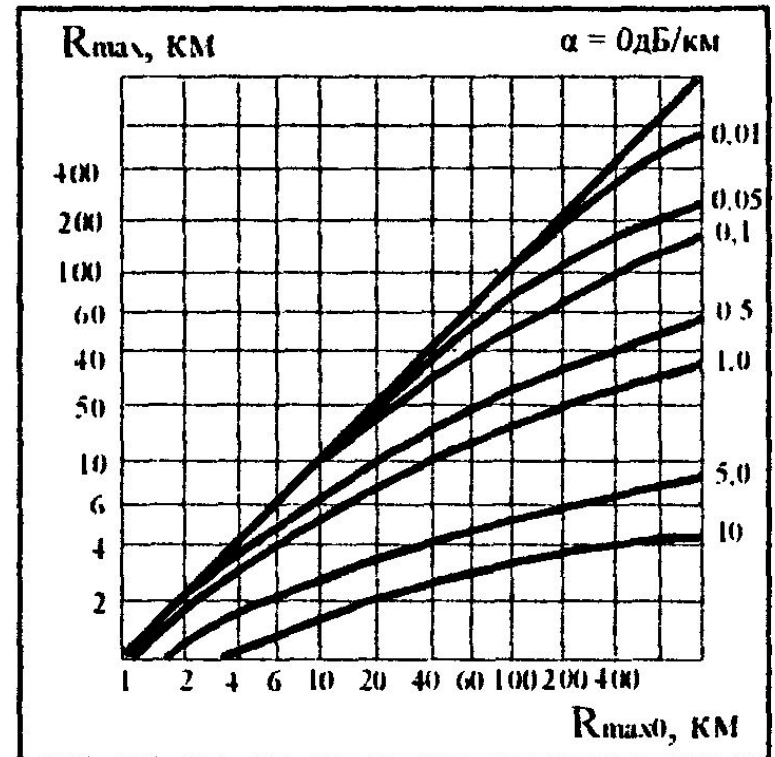
$$P_{\text{с мин}} = \{ \square \} / 2\alpha_3 R_{\text{макс}}^5 \text{ - атмосфера}$$

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

$$-0,05 \alpha_3 R_{\text{макс } 0}$$

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

Дождь может идти не на всей длине трассы





# Рефракция радиоволн в атмосфере

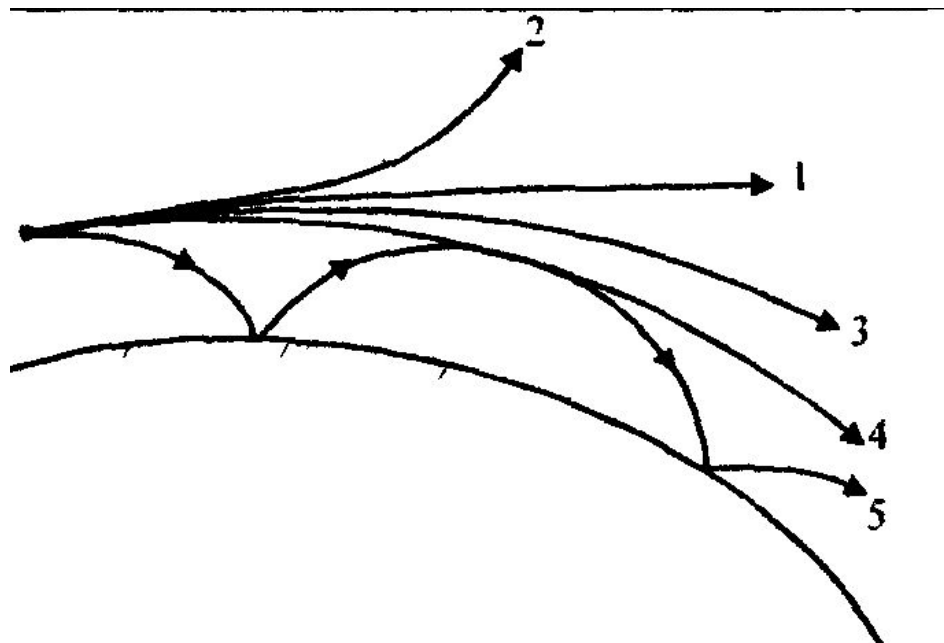
Рефракция – отклонение от прямолинейного распространения радиоволн в среде с изменяющимися (в пространстве!) электрическими параметрами.

Диэлектрическая проницаемость атмосферы –  $\epsilon_a$  (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.



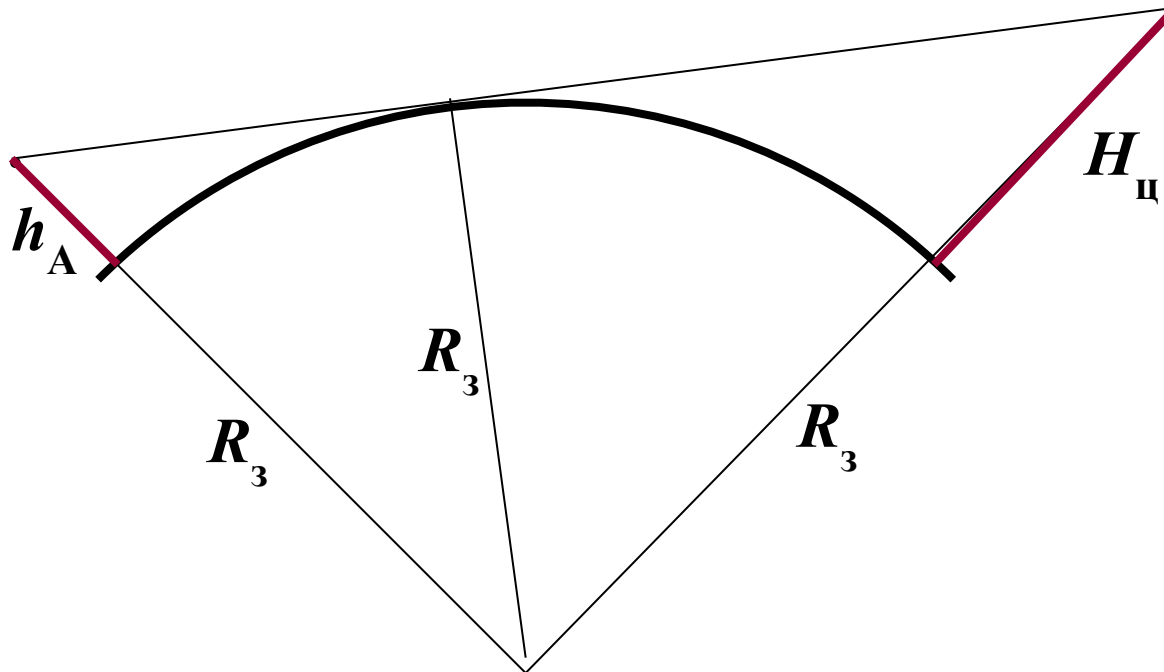
- $g_n = 0$  – рефракция отсутствует, траектория прямолинейна (1);
- $g_n > 0$  – отрицательная рефракция, траектория отклоняется вверх (2);
- $g_n < 0$  – положительная рефракция, траектория отклоняется вниз (3);

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



$$D_{\text{PB}} [\text{KM}] = 3,57 \cdot (\sqrt{h_A} [\text{M}] + \sqrt{H_{\text{ц}}} [\text{M}])$$

$$R_3 = 6380 \text{ KM}$$

$$D_{\text{PT}} [\text{KM}] = 4,12 \cdot (\sqrt{h_A} [\text{M}] + \sqrt{H_{\text{ц}}} [\text{M}]),$$

$$R_{3 \text{ экв}} = (4/3) R_3$$

## Влияние подстилающей поверхности

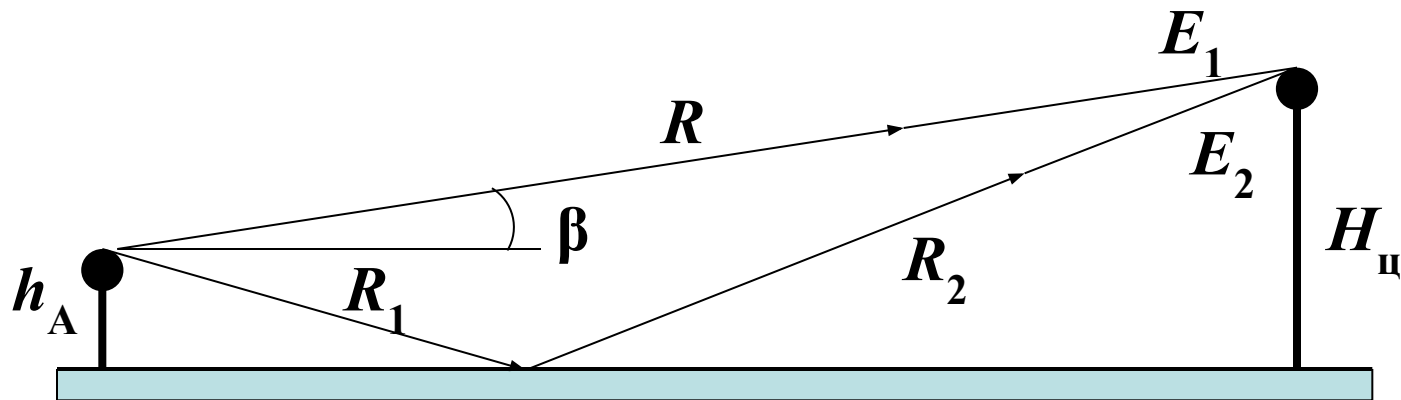
- Огибание радиоволнами земной поверхности, наряду с атмосферной рефракцией, возможно в связи с дифракцией радиоволн.
- Проблема – потери в подстилающей поверхности, возрастающие с частотой.
- Дальность действия порядка 1000 км можно обеспечить только на частотах ниже 300 кГц. В связи с этим в РНС дальнего действия используются диапазоны ДВ и СДВ.
- Затухание поверхностной волны зависит от
  - $\epsilon_{\text{п}}$  = 5 ... 80 (песчаная пустыня ... морская вода);
  - $\sigma_{\text{п}}$  = 0,0001 ... 5 См/м. С уменьшением проводимости поверхности затухание резко увеличивается. Волна может «глубже проникнуть землю».

## Влияние отражения радиоволн ионосферой

- 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 при  $\lambda=10 \dots 15$  м.
- Расчет дальности действия затруднен из-за нестационарности процессов, влияющих на распространение, рассеяние и поглощение радиоволн.

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

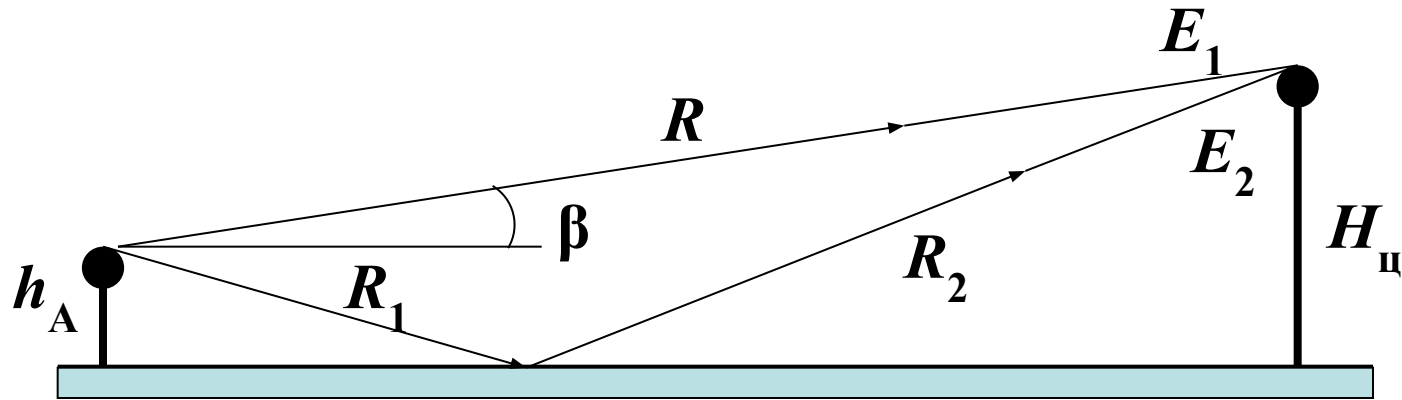
Радиоволна, отраженная земной поверхностью, интерферирует с прямой волной дважды: в точке цели и в точке РЛС.



Модель: зеркально отражающая поверхность (спокойная вода) и расстояние до цели намного меньше дальности радиогоризонта.

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:

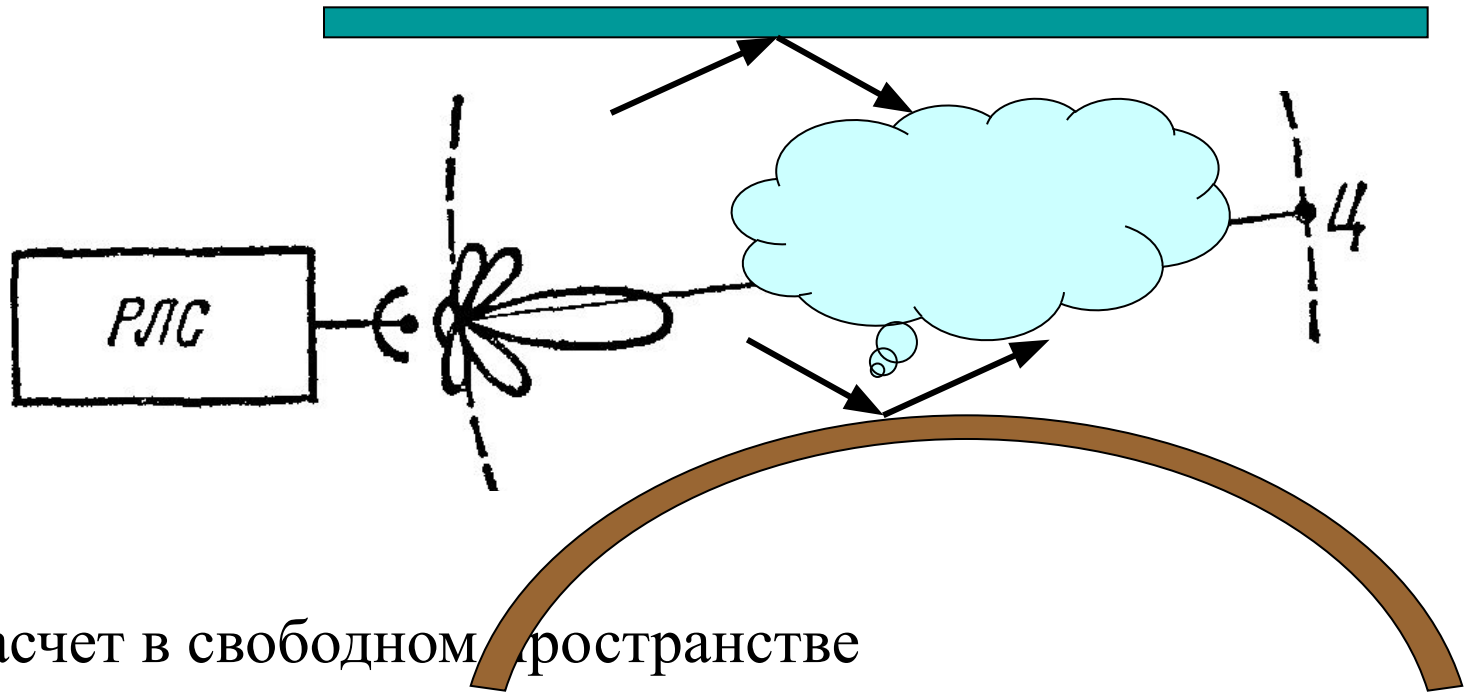
$$R_{\text{макс}} = F_0 \sqrt[4]{\frac{2E_{\text{и}} G_A^2 \lambda^2 \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 h_{\text{пор}}^2 kT_{\text{ш}}}}$$

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

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

Низколетящую цель трудно обнаружить!

## Итоги оценки дальности действия РЛС



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



## Параметр обнаружения и отношение сигнал/шум

Далее в теории обнаружения будет использоваться «параметр обнаружения»

$$q = \sqrt{\frac{2E}{N_0}}$$

По физическому смыслу – это тоже отношение С/Ш.

Найдем связь параметра обнаружения  $q$  и отношения С/Ш,

представленного в виде  $\text{С/Ш} = \frac{U_c}{\sigma_{\text{ш}}}$

$$q = \sqrt{\frac{2E}{N_0}} = \sqrt{\frac{U_c^2 \tau_{\text{и}} \Delta f}{2\sigma_{\text{ш}}^2}} \approx \frac{U_c}{\sigma_{\text{ш}}} = \frac{\text{С}}{\text{Ш}} \quad \text{при } \Delta f = 2 / \tau_{\text{и}}$$

$$E = \frac{U_c^2}{2} \tau_{\text{и}} \quad \frac{N_0}{2} \Delta f = \sigma_{\text{ш}}^2$$