

Дисциплина
«РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ»

Часть 1. Теоретические основы
радиолокации

Лекция №4

**Явление вторичного излучения
радиоволн**

Отражение, рассеяние и переизлучение
радиоволн объектами (целями)

Использованная литература

- Л 1/о с. 36-49;
- Л 1/д с. 24-54.

Цель лекции - раскрыть содержание основ научных знаний о вторичном излучении радиоволн, отражательных характеристиках типовых объектов и реальных целей.

Учебные вопросы:

- 1. Характеристики радиолокационных целей.**
- 2. Эффективная площадь рассеяния целей.**
- 3. Эффективная площадь рассеяния различных объектов.**

Вопрос 1

Характеристики радиолокационных целей

5

Источником информации об объектах является отраженная ЭМВ, приходящая к приемной антенне РЛС. Эффективность решения задач радиолокационного наблюдения во многом определяется знанием законов рассеяния ЭМВ объектами.

Вторичным (пассивным) называют излучение, происходящее вследствие рассеяния энергии ЭМВ неоднородностями (препятствиями, объектами).

Падающую на препятствие волну **называют первичной**, а отраженную или рассеянную - **вторичной**.

Вторичное излучение радиоволн наблюдается в том случае, когда на пути распространения радиоволн располагается неоднородность (объект, препятствие) с другими, чем у среды, параметрами: ϵ - электрической и μ - магнитной проницаемостями.

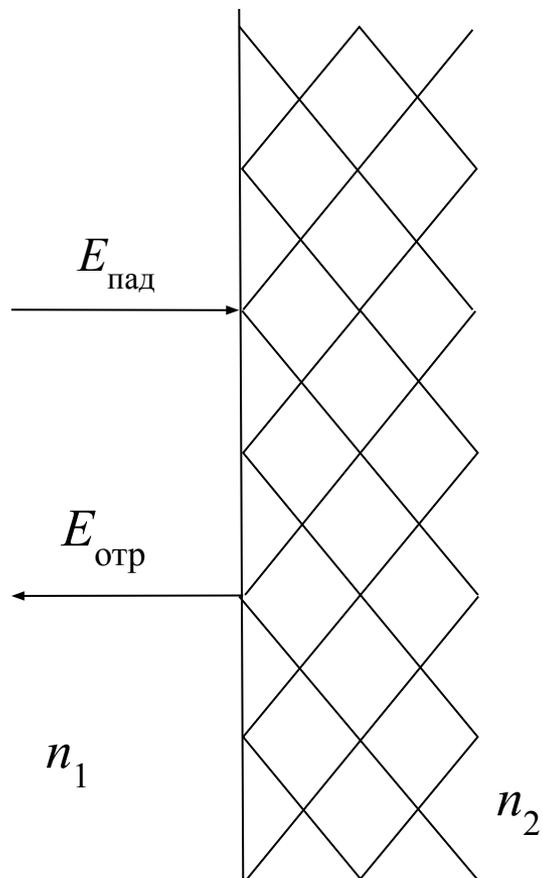
При этом волновое сопротивление объекта не равно волновому сопротивлению

$$\left(\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \right) \text{ объекта} \neq \left(\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \right) \text{ среды}$$

В свою очередь **равенство этих величин означает поглощение** радиоволн.

Поле вторичного излучения определяется параметрами первичной (падающей) волны и параметрами вторичного излучателя.

- К первым относятся, например, длина волны и поляризация ЭМВ. Ко вторым – μ , ϵ , размеры и форма объекта, его ориентация относительно фронта (поверхности равных фаз) падающей волны. Очень важным является **отношение линейных размеров вторичного излучателя к длине падающей волны**. Это отношение влияет как на характер поля вторичного излучения, так и на его интенсивность.



Отражение от плоской
поверхности

n_1 и n_2 - коэффициенты преломления

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}$$

$$\xi = \left| \frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}} \right|^2 = \frac{\left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right)^2}{\left(\frac{n_2}{n_1} + 1 \right)^2} \quad \text{коэффициент отражения}$$

При одинаковых коэффициентах преломления сред $n_1 = n_2$ коэффициент отражения $\xi = 0$, т. е. ЭМВ не отражается от границы двух сред. При $n_1 \gg n_2$ происходит почти полное отражение волны $\xi \approx 1$.

ВЫВОД

Таким образом, радиолокационные цели являются вторичными излучателями, поле которых определяется как параметрами первичной волны, так и параметрами самих целей.

Вопрос 2

**Эффективная площадь рассеяния
целей**

Для характеристики отражающих свойств целей вводится термин «эффективная отражающая поверхность» (ЭОП) или чаще «эффективная площадь рассеяния» (ЭПР).

Рассмотрим физическую сущность этого показателя. Пусть в свободном пространстве расположены РЛС и облучаемая цель Рис. 1.

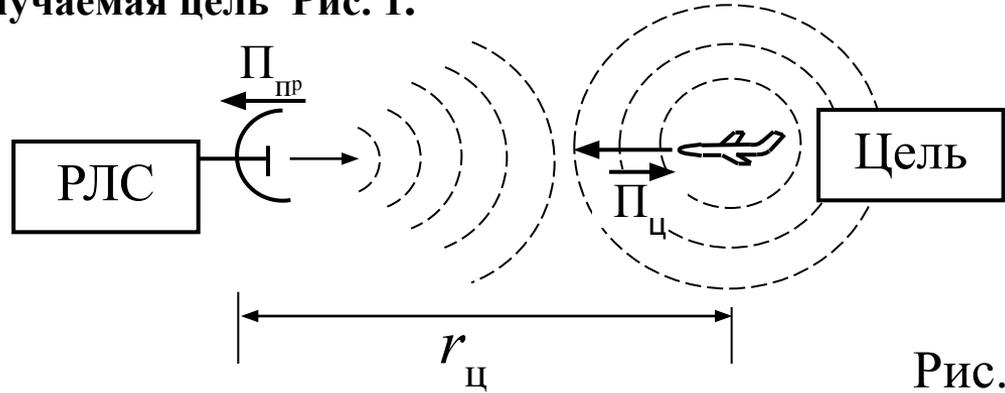


Рис. 1.

Расстояние от РЛС до цели $r_{ц}$. Плотности потоков мощности первичной волны в точке цели $\Pi_{ц}$ и вторичной волны в точке приема $\Pi_{пр}$ считаются известными.

Заменим цель воображаемым ненаправленным вторичным излучателем, который рассеивает всю падающую на него мощность равномерно и в точке приема создает такую же плотность потока мощности, что и реальная цель, т.е. $\Pi_{пр}$. Тогда суммарная мощность, рассеиваемая введенным излучателем равна

$$P = \Pi_{ц} r_{ц}^2$$

Отношение этой мощности к плотности потока мощности первичной волны у цели называется эффективной площадью рассеяния

$$\sigma_{ц} = \frac{P}{\Pi_{ц}} = 4\pi r_{ц}^2 \frac{\Pi_{пр}}{\Pi_{ц}} \cdot (1)$$

Таким образом, под ЭПР понимают площадь воображаемого вторичного излучателя, равномерно рассеивающего всю падающую на него мощность и создающего в точке приема такую же плотность потока мощности, что и реальная цель.

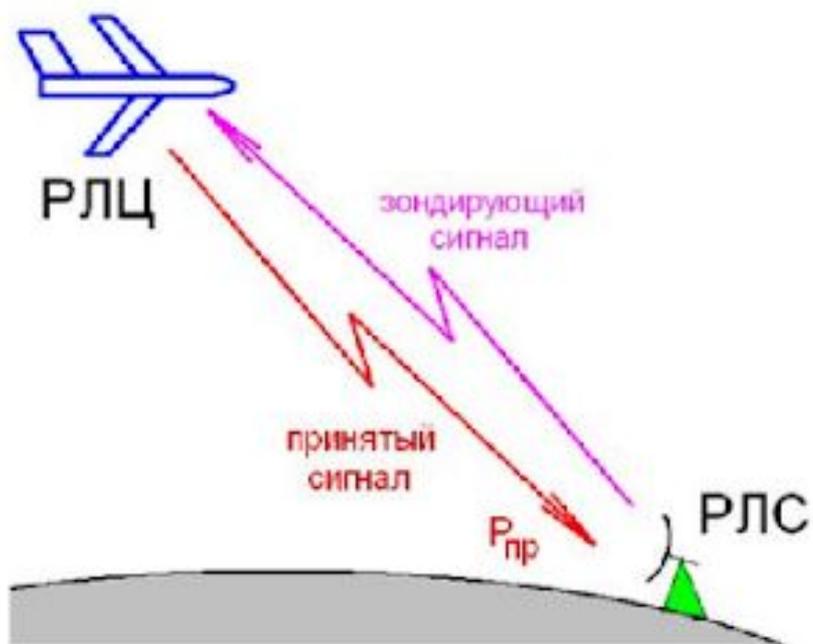
$$\sigma_{\text{ц}} = 4\pi r_{\text{ц}}^2 \frac{E_{\text{пр}}^2}{E_{\text{ц}}^2} = 4\pi r_{\text{ц}}^2 \frac{H_{\text{пр}}^2}{H_{\text{ц}}^2} \quad (2)$$

- Величина $\sigma_{\text{ц}}$ не зависит от дальности до цели $r_{\text{ц}}$, т.к. величина $\Pi_{\text{пр}}$ при заданной $\Pi_{\text{ц}}$ обратно пропорциональна величине $(r_{\text{ц}})^2$
- Напряжение на входе приемника РЛС $U_{\text{пр}} = k \times E_{\text{пр}}$, поэтому при фиксированном расстоянии $r_{\text{ц}} = r_0$

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{r_{\text{пр}}^2 \cdot U^2}{\Pi_{\text{ц}} \cdot k^2} = K_1 \cdot U_{\text{пр}}^2.$$

- Отсюда следует, что отношение мощностей сигналов, принятых от 2-х различных целей, находящихся на одной дальности, соответствует отношению их ЭПР:

$$\frac{U_{\text{пр}1}^2}{U_{\text{пр}2}^2} = \frac{\sigma_{\text{ц}1}}{\sigma_{\text{ц}2}} \quad (\text{при } r_1 = r_2). \quad \sigma_{\text{ц}} = \frac{\sigma_{\text{эт}} \cdot U_{\text{пр} \text{ ц}}^2}{U_{\text{пр} \text{ эт}}}$$



а



б

Рис. 14. Эффективная поверхность рассеивания цели.

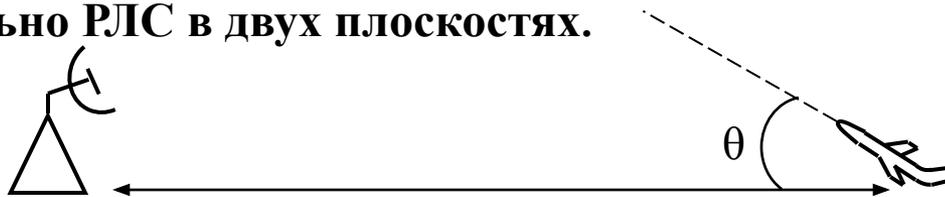
1
2

ЭПР цели существенно зависит от ориентации цели относительно направления на РЛС.

Зависимость величины ЭПР от угла поворота цели относительно направления на РЛС

называется **диаграммой обратного вторичного излучения**, т.е. $\sigma_{\text{ц}} = \sigma_{\text{ц}}(\theta)$ (рис. 2).

В общем случае $\sigma_{\text{ц}} = \sigma_{\text{ц}}(\beta, \varepsilon)$, поскольку реальная цель может менять свою ориентацию относительно РЛС в двух плоскостях.



1). Электрические и магнитные свойства материала цели.

- ЭПР ($\sigma_{\text{ц}}$) тем больше, чем больше отличаются ε и μ цели от соответствующих параметров окружающей среды.

2). Характер поверхности цели

- Если неровности на поверхности цели (Δh)
- удовлетворяют условию

$$\Delta h \leq \frac{\lambda}{\theta \sin \theta}$$

где θ - угол падения РВ; то отражение носит зеркальный характер. В остальных случаях оно является диффузным.

- 3). Относительные размеры цели, которые определяются отношением ее линейного размера l к длине волны λ : l/λ .

- Зависимость $\sigma_{\text{ц}}$ от l/λ более сложная, поэтому ниже рассмотрим её подробнее.

ВЫВОД

Таким образом, количественно отражательные свойства целей оценивают их ЭПР. ЭПР цели зависит от электрических и магнитных свойств материала цели, характера поверхности цели и её относительных размеров.

Вопрос 3

**Эффективная площадь
рассеяния различных объектов**

Расчет ЭПР сосредоточенных вторичных излучателей сводится к решению двух задач.

- Первая задача состоит в отыскании наведенных токов по заданному полю первичной волны.
- Вторая задача заключается в нахождении поля вторичного излучения по найденному распределению наведенных токов.

Рассмотрим вначале отражающие свойства простых радиолокационных объектов.

а) ЭПР тел, малых по сравнению с длиной волны λ (рис. 3.) Для таких тел $l \ll \lambda$. Простейшей моделью является тонкий провод с пластинками на концах (рис. 3).

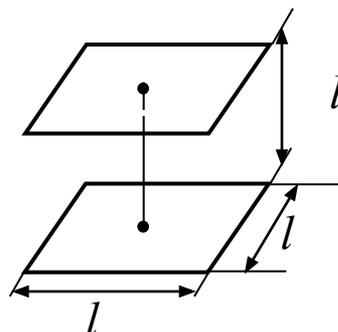


Рис. 3.

$$\sigma = \frac{4\pi^3 l^6}{\lambda^4}$$

Она представляет элементарный вибратор с емкостным сопротивлением.

а) ЭПР тела, малого по сравнению с длиной волны, не зависит от формы тела и пропорциональна квадрату его объема и обратно пропорциональна четвертой степени длины волны.

$$\sigma = k \cdot \left(\frac{l}{\lambda} \right)^4 \cdot l^2,$$

к - коэффициент пропорциональности, т.е. $\sigma \ll l^2$.

1
6 б). ЭПР целей, сравнимых с длиной волны : $l \approx \lambda$. Простейшим примером такой цели является полуволновой вибратор (рис. 4).

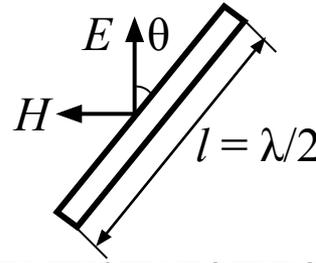
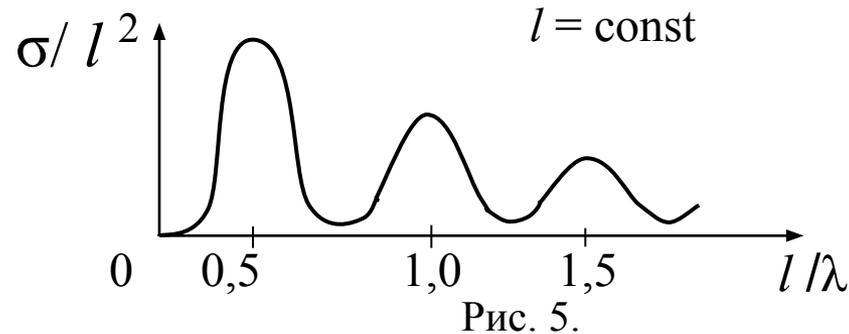


Рис. 4.

При равенстве длины вибратора целому числу полуволн наступает резонанс наведенного тока. Поэтому зависимость σ от величины l/λ носит резонансный характер (рис.5).



$$l = \frac{\lambda}{2}$$

Рис. 5.

Для резонансного случая, когда длина вибратора

$$\sigma_{\text{в}} = 0,86\lambda^2 = 0,86(2l)^2 \quad (4)$$

Соотношение (4) показывает, что ЭПР полуволнового вибратора при резонансе значительно превышает его геометрическую площадь.

Полуволновой вибратор является антенной направленного действия с ДН

$$F(\theta) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\sin\theta\right)}{\cos\theta} = \cos\theta$$



Эта диаграмма оказывает влияние, как при приеме ЭВМ, так и при ее излучении. В результате амплитуда поля изменится в $F^2(\theta)$ раз, а величина σ_B - в $F^4(\theta)$, т.е.

$$\sigma(\theta) = \sigma_B \cos^4 \theta$$

Ориентация вибратора в пространстве может быть произвольной. Поэтому вводят понятие средней ЭПР, которая при равновероятном расположении вибратора в пространстве равна

$$\bar{\sigma}_B = 0,17\lambda^2 = 0,17(2l)^2.$$

Полуволновые вибраторы используют для создания пассивных помех. Если в разрешаемом объеме находится n полуволновых вибраторов, то ЭПР помехи.

$$\bar{\sigma}_n = 0,17\lambda^2 \cdot n \tag{5}$$

Таким образом, особенностями вторичного излучения в рассмотренном случае являются:

резонансный характер вторичного излучения, обусловленный резонансом наведенных токов при $k = \frac{\lambda}{2}$ ($k=1,2,\dots$) и зависимость $\sigma_{\text{ц}}$ от ориентации тела относительно фронта волны, а также поляризации колебаний.

ЭПР радиолокационных целей, размеры которых превышают длину волны
 Размеры аэродинамических целей, как правило, намного превышают длину волны облучаемых ЭМ колебаний. ЭПР таких целей рассмотрим на примере выпуклых и плоских поверхностей.

ЭПР шара

$$\frac{l}{\lambda} \gg 1$$

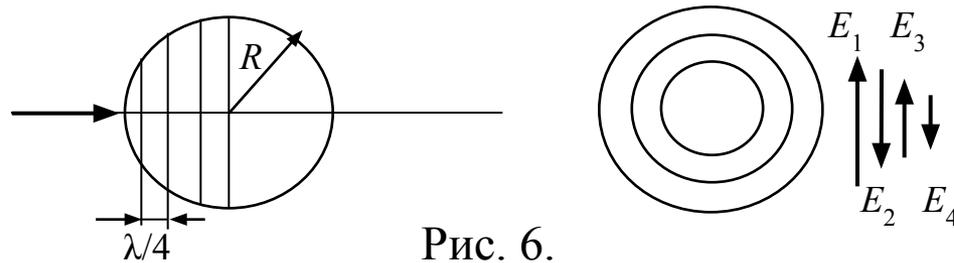
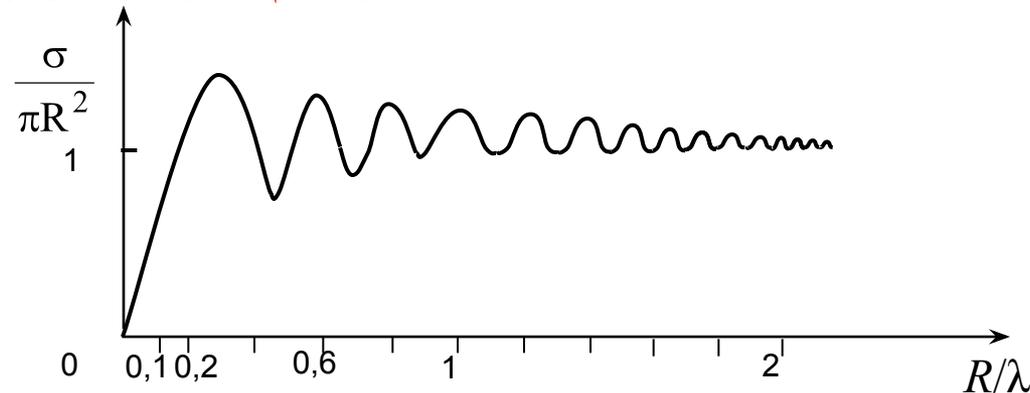


Рис. 6.

- Поверхность разобьется на ряд круговых колец, называемых зонами Френеля. Каждая зона по отношению к соседней является противофазным источником вторичного излучения.
- Суммарная напряженность поля вторичного излучения при большом числе зон (т.е. при $R \gg \lambda$) стремится к постоянной величине, определяемой первой зоной Френеля (см. рис.6).
- Область локализации вторичного излучения на поверхности цели («светящийся» элемент поверхности), которой в рассматриваемом случае является первая зона Френеля, называется «**блестящей точкой**».



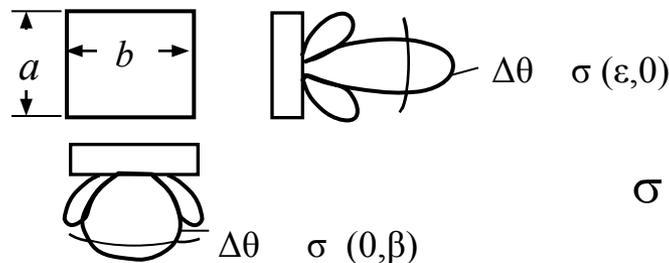
$$\sigma_{\text{ш}} = \pi R^2$$

Рис. 7.

Независимость ЭПР от длины волны и наличие «**блестящих точек**» характерно не только для металлического шара, но и для любых тел с обращенной к РЛС выпуклой проводящей поверхностью (параболоид, эллипсоид и т.д.), радиус кривизны которой намного больше длины волны.

Металлическая пластина

Вторичное излучение пластины является направленным (рис. 8). Максимальное значение ЭПР пластина имеет тогда, когда она ориентирована перпендикулярно направлению облучения. В этом случае



$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} a^2 b^2 = \frac{4\pi}{\lambda^2} S^2,$$

Рис. 8

гораздо больше геометрической площади S . Ширина ДН обратного вторичного определяется размером соответствующей стороны пластины и равна

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{a(b)} \text{ рад.}$$

«Блестящие точки» (четыре) расположены у краев пластины.

Групповой излучатель

Реальную цель можно рассматривать как вторичный групповой излучатель, состоящий из совокупности элементарных излучателей. Для выявления особенностей вторичного излучения в этом случае рассмотрим ЭПР простейшего группового излучателя, состоящего из двух элементарных излучателей (рис. 9).

Пусть расстояние между одиночными излучателями равно l , а расстояние их от РЛС, соответственно, r_1 и r_2 .



$$E_p = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \Delta\varphi},$$

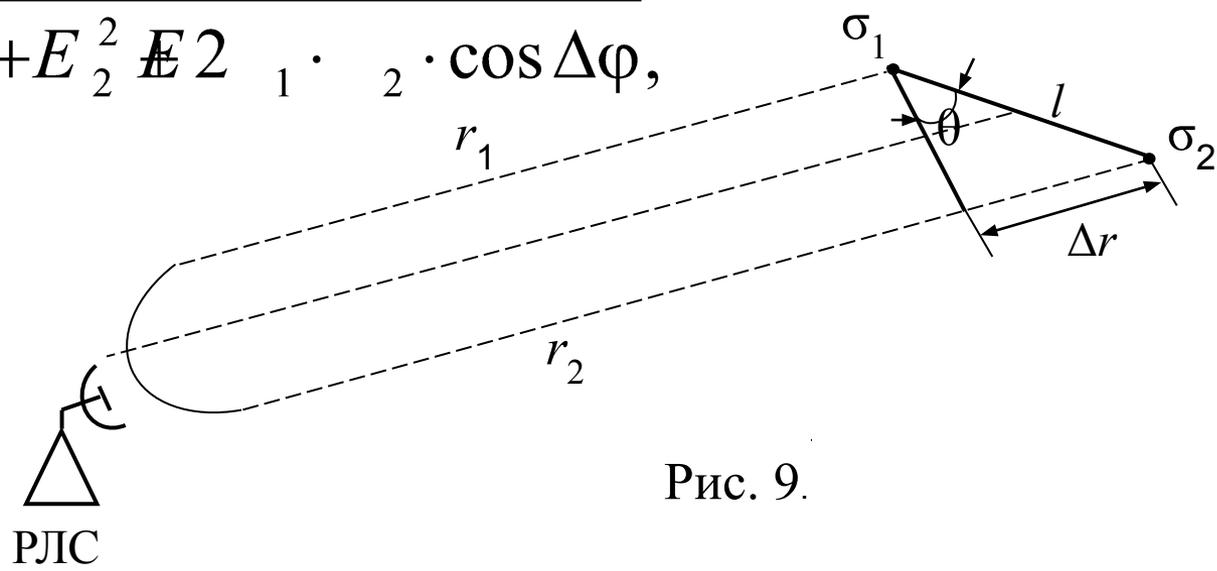


Рис. 9.

Где $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta r = \frac{4\pi}{\lambda} l \sin \theta$ -разность фаз, обусловленная разностью хода волн.

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{E_{\text{ц}}^2}{E_{\text{ц}}^2} \left(E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \cos \Delta\varphi \right) = \sigma_1 + \sigma_2 + 2\sqrt{\sigma_1 \cdot \sigma_2} \cos \Delta\varphi$$

Из полученного выражения следует, что ЭПР группового излучателя зависит как от ЭПР элементарных излучателей, так и от взаимного их расположения относительно фронта волн.

Диапазон изменения σ при изменении θ определяется значениями

$$\sigma_{\text{макс}} = \left(\sqrt{\sigma_1} + \sqrt{\sigma_2} \right)^2;$$

$$\sigma_{\text{мин}} = \left(\sqrt{\sigma_1} - \sqrt{\sigma_2} \right)^2.$$

$$\sigma = 2\sigma_0 \left[1 + \cos \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \sin \theta \right) \right]. \quad (5)$$

Диаграммы обратного вторичного излучения, построенные по (5) при условии $\lambda/l = \text{const}$ имеют вид

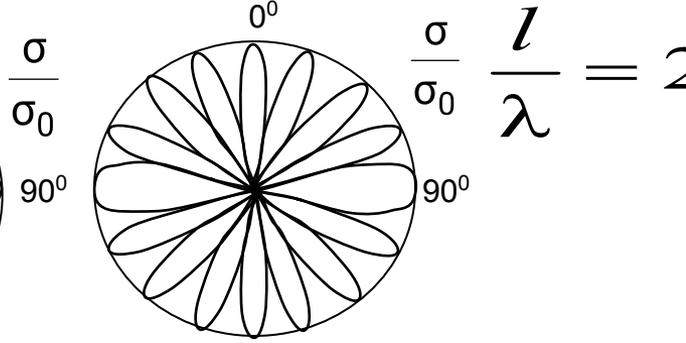
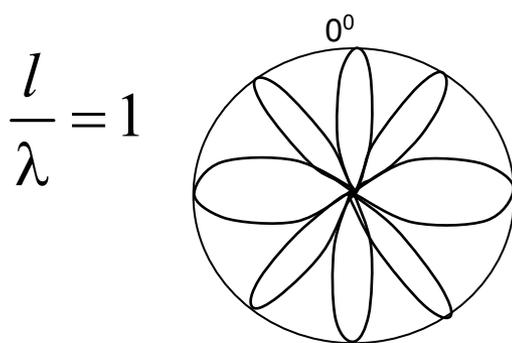
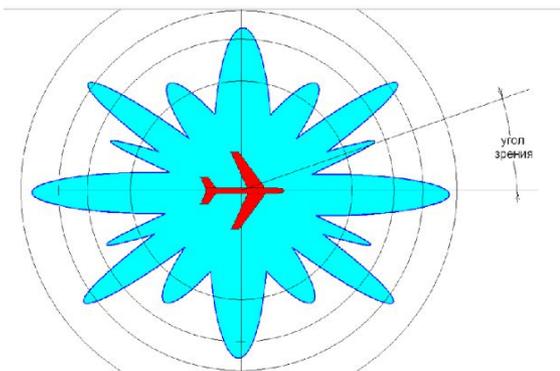


Рис. 10

Нули диаграммы $\sigma(\theta)$ соответствуют направлениям, где вторичные волны приходят в противофазе, а максимумы - где волны складываются в фазе. Чем больше l/λ , тем сильнее проявляется интерференционный характер зависимости $\sigma(\theta)$.

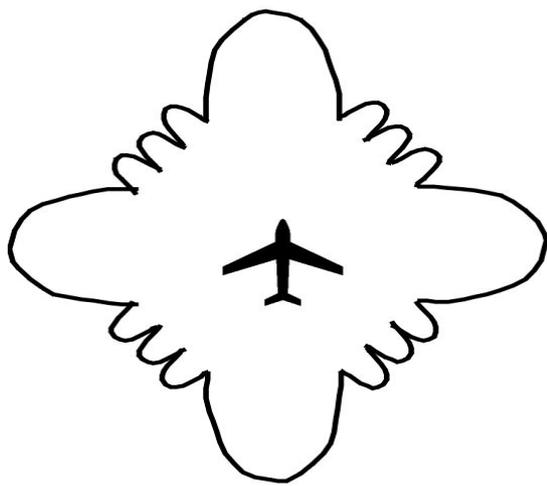
В общем случае, когда цель представляет собой совокупность n элементарных излучателей,

получим

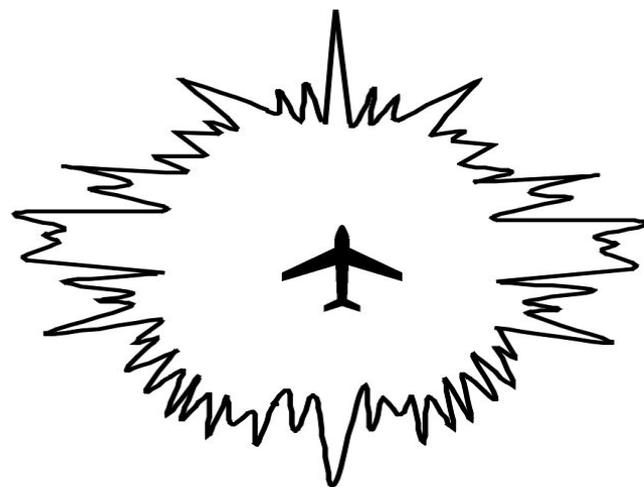
$$\sigma = \sum_{i=1}^n \sigma_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos \Delta\varphi_{ij}.$$

ЭПР реальных целей

- Большинство реальных целей, в том числе аэродинамических (самолеты и т. д.) и космических (головки баллистических ракет, искусственные спутники), имеют размеры значительно превышающие длину волны современных РЛС.
- Выпуклые и плоские участки, обычно проводящей, поверхности целей создают большое число «блестящих» точек, вторичное излучение которых взаимодействует друг с другом.
- Поэтому диаграммы обратного вторичного излучения реальных сосредоточенных целей, как и групповых целей, имеют многолепестковый изрезанный характер

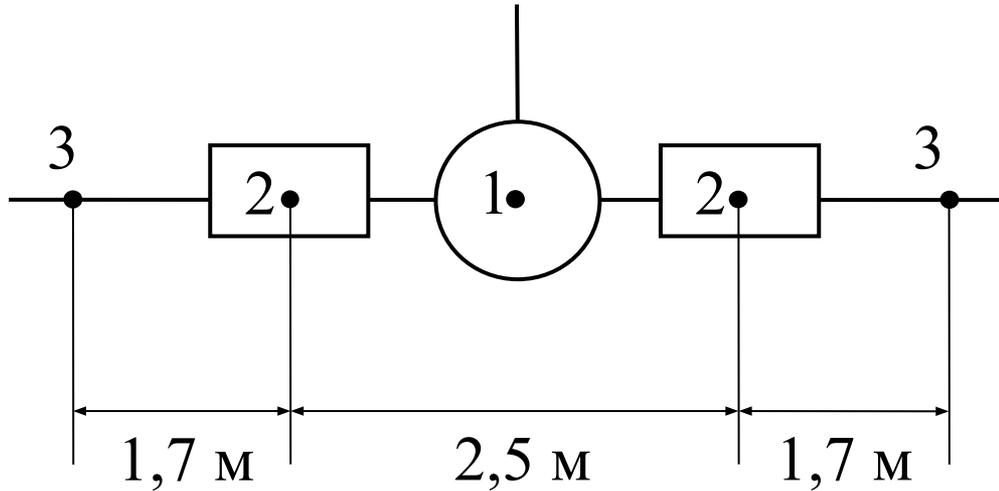


а)



б)

Распределение отраженного поля по поверхности объектов



Положение «блестящих точек» отражения самолета-истребителя с переднего ракурса облучения

Точка 1 соответствует носу фюзеляжа, 2 – воздухозаборникам, 3 – излому кромки крыла. Расстояние между блестящими точками значительно превышает размеры областей отражения, формирующих эти точки.



На практике ЭПР оценивается экспериментально на моделях и в натуре. Средние значения ЭПР некоторых реальных целей указаны в таблице.

ТИП ЦЕЛИ	ЭПР [м]2
Бомбардировщик	5...20
Истребитель	1...5
КР	0,1...0,8
ГЧ БР (БПЛА)	0,001...0,1

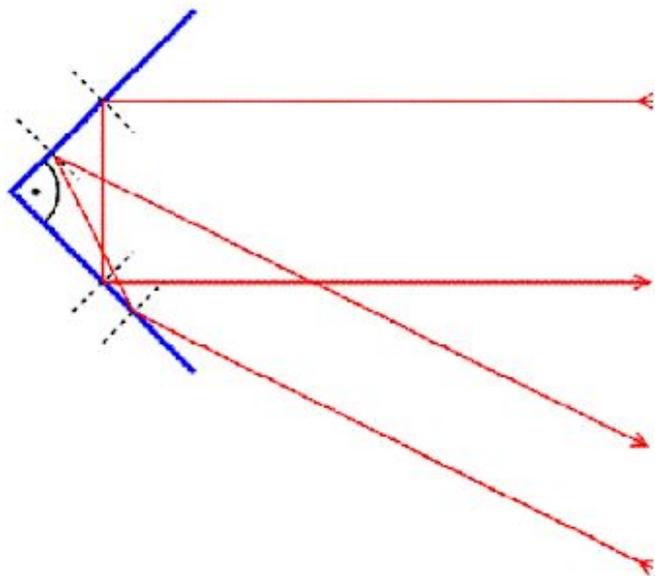


Рис. 4. Угловой отражатель: принцип действия и внешний вид.

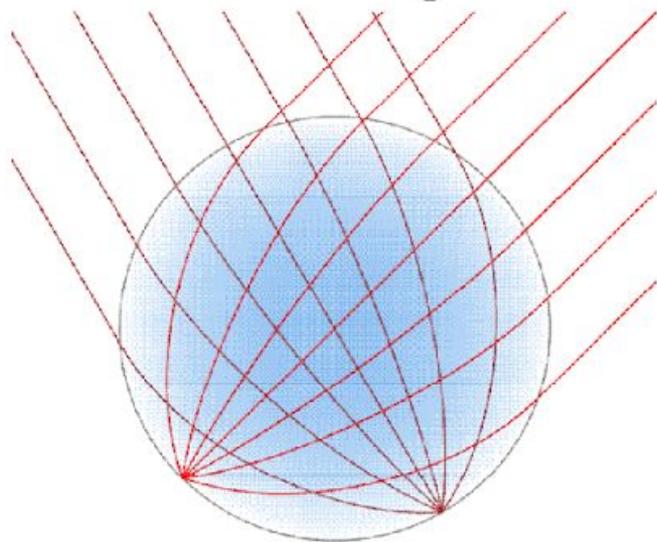


Рис. 5. Линза Люниберга: принцип действия и внешний вид «в расколе»
(после воздействия поражающих элементов ЗУР).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- **Отражательные способности РЛ целей** определяются как параметрами ЭМВ (длина, угол падения и пр.) так и характеристиками цели (конфигурацией, линейными размерами, электрическими и магнитными свойствами и т.п.).
- Для количественной оценки этих свойств используют эффективную площадь рассеяния цели.
- Наиболее существенно на ЭПР целей влияют электрические и магнитные свойства цели, характер поверхности цели и относительные размеры цели.
- Реальные цели можно представить в виде комбинации «блестящих точек», гладких и шероховатых поверхностей и большого числа элементарных отражателей. ЭПР таких целей имеет сложный характер, изменяется от ракурса цели и оценивается статистическими характеристиками (например, средним значением).
- Измеряют ЭПР обычно в натуральных экспериментах или на моделях.



Задание на самоподготовку

Материал лекции отработать в соответствии с рекомендуемой литературой.

- **Л 1/о с. 37-49;**
- **Л 1/д с. 24-54.**