

Глава 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

2.1. ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ ЦЕЛЯМИ

Известно, что в изотропной среде электромагнитные волны (ЭМВ) распространяются прямолинейно с постоянной скоростью. Любая неоднородность электрических параметров среды распространения (диэлектрической или магнитной проницаемостей, проводимости) приводит к возникновению рассеяния ЭМВ. На поверхности цели, как на границе раздела двух сред, под воздействием поля падающей ЭМВ возникают токи проводимости (если поверхность проводящая) или токи смещения (если поверхность диэлектрическая). Эти токи являются причиной возникновения вторичного излучения радиоволн.

В однопозиционной радиолокации представляет интерес энергия рассеянной ЭМВ, которая воспринимается в точке расположения РЛС, то есть энергия отраженной обратно волны. Поэтому при активном методе радиолокации обычно говорят не о рассеянии, а об отражении ЭМВ. Интенсивность вторичного излучения и характер отражений зависит от геометрических размеров и конфигурации цели, физических свойств вещества, из которого она сделана, длины волны и поляризации падающей на цель ЭМВ. При использовании узкополосных сигналов ($\Delta f_c/f_0 \ll 1$, где Δf_c – ширина спектра сигнала, f_0 – несущая частота ЭМВ) форма отраженного радиолокационного сигнала не изменяется. Применение сверхширокополосных сигналов ($\Delta f_c/f_0 \approx 1$) приводит к отличию структуры отраженного сигнала от зондирующего и зависимости ее от ракурса цели. В процессе дальнейшего изложения будем считать радиолокационный сигнал узко-

полосным, что соответствует реальным условиям работы РЛС.

В зависимости от соотношения между длиной волны λ зондирующего колебания, высотой h шероховатостей (рис.2.1) и размером цели различают следующие виды вторичного излучения: зеркальное отражение, диффузное рассеяние и резонансное излучение. Зеркальное отражение наблюдается при облучении гладких поверхностей ($h < \lambda/16$) и целей, размеры которых много больше длины волны.



Рис. 2.1.

В этом случае соблюдается закон зеркального отражения – угол падения волны равен углу ее отражения. Свойством диффузного отражения (рассеяния) обладают большие поверхности с размерами шероховатостей порядка длины волны облучающих колебаний ($h \approx \lambda$). Резонансное излучение имеет место при размерах a облучаемой цели, кратных нечетному числу полувольт, то есть когда $a = 0,5(2n+1)\lambda$, $n=0,1,2,3,\dots$. В этом случае при определенной ориентации цели относительно вектора поляризации падающей ЭМВ наблюдается интенсивное и направленное вторичное излучение, создающее сильный отраженный сигнал.

Реальные радиолокационные цели являются сложными геометрическими объектами, поэтому существенным для создания поля отраженной волны является установление связи между параметрами поля, рассеянного целью, размером a цели и длиной волны λ зондирующей ЭМВ. При формировании поля отраженной ЭМВ существенную роль играют три области рассеяния: 1 – низкочастотная (релеевская), $ka \ll 1$; 2 – резонансная, $ka \approx 1$; 3 – высокочастотная (квазиоптическая), $ka \gg 1$, где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

При выполнении условия $ka \gg 1$ в формировании поля, рассеянного целью, участвуют зеркальные отражения, отражения от участков разрыва гладкой поверхности (край, ребро, острие и т.п.), «ползучие» волны, возникающие на границе рассеяния «свет-тень» (рис.2.2), «бегущие» волны, возникающие при наклонном падении

поля на слабовыпуклые поверхности, отражения от вогнутых участков поверхности цели. На рис. 2.2 обозначены: 1 – направление прихода падающей волны; 2 – освещенная часть контура объекта; 3 – теневая часть контура объекта; 4 – граница раздела «свет-тень».

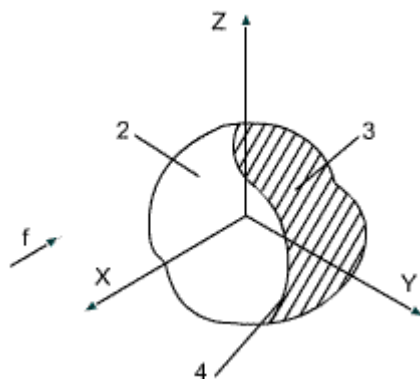


Рис. 2.2.

Изучение отражений от гладких выпуклых поверхностей привело в радиолокации к понятию «блестящий» или «светящейся» точки.

Рассмотрим выпуклую поверхность двойной кривизны, например, параболоид (к данным поверхностям относятся также шар и эллипсоид), каноническое уравнение которого

$\frac{x^2}{2r_1} + \frac{y^2}{2r_2} = z$, где r_1 – радиус максимальной кривизны сечения параболоида плоскостью XOZ (рис.2.3,а), а r_2 – радиус максимальной кривизны в плоскости YOZ .

Отражающую способность такой поверхности рассмотрим на основе использования зон Френеля. Под зоной Френеля понимают участок поверхности, который по отношению к соседнему является противофазным вторичным излучателем. Следовательно, протяженность зоны Френеля можно определить из выражения $\Delta\varphi = 2\pi f_0 \Delta t$, где Δt – разность времен запаздываний сигналов, отраженных от соседних зон Френеля. Отсюда, обозначив ширину зоны Френеля как $\Delta\ell$ и учитывая, что $\lambda = c/f_0$, получаем $\Delta\ell = 0,25\lambda$. Следовательно, ширина

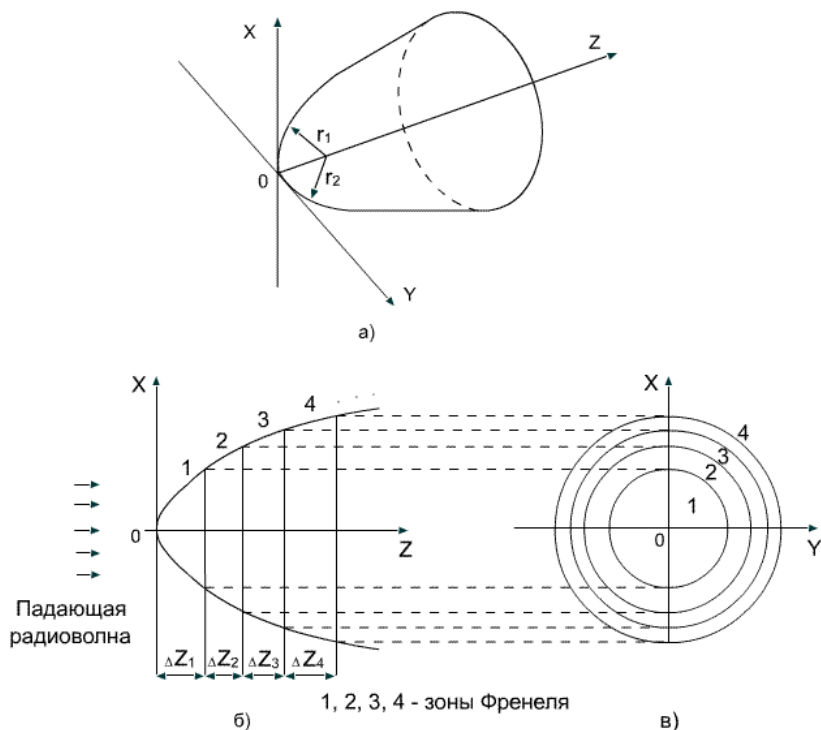


Рис. 2.3.

каждой зоны Френеля в направлении падения радиоволны должна быть равна $\lambda/4$ (рис.2.3,б). На рис. 2.3,в приведена проекция зон Френеля на плоскость фронта падающей волны (плоскость XOY). Площади всех зон равны. Однако с увеличением номера зоны растет ее наклон по отношению к направлению падения волны. Поэтому, чем больше номер зоны Френеля, тем меньше напряженность поля отраженной от нее волны ($E_1 > E_2 > E_3 > \dots$). В результате интерференции волн отраженное поле формируется в основном первой зоной Френеля, а сигналы от других зон компенсируются. Такую отражающую часть выпуклой поверхности называют «блестящей» или «светящейся» точкой цели. В однопозиционной радиолокации «светящимися» областями являются те участки поверхности цели, где нормаль к поверхности совпадает с направлением облучения. Рассе-

янное поле достаточно больших, выпуклых, идеально проводящих целей, имеющих края и ребра, можно описать в виде суммы сферических волн, рассеянных «блестящими» точками, локализованными на геометрических неоднородностях поверхности цели.

Необходимо заметить, что «блестящие точки, обусловленные различными видами отражения, неодинаково ведут себя при изменении ракурса цели. «Блестящие» точки «зеркального» типа не связаны жестко с конкретным участком поверхности цели. В общем случае перемещение «зеркальных» точек имеет место, когда гладкие отражающие участки имеют кривизну в плоскости изменения ракурса. Аналогично ведут себя и точки теневого контура. «Блестящие» точки, локализованные на краях и ребрах, являются частично связанными с центром масс цели. При изменении ракурса они «скользят» вдоль некоторых пространственных кривых, зависящих от конфигурации цели. По сравнению с первым типом отражателей они дают больше информации о форме объекта при его движении.

Жестко связаны с центром масс цели «блестящие» точки, локализованные на вершинах конических поверхностей, небольших выступах на гладкой поверхности. Перемещение данных точек при изменении ракурса цели позволяет определить характер движения цели вокруг ее центра масс. При выполнении условия $ka \approx 1$, то есть в резонансной области, составляющими, которые оказывают основное влияние на формирование поля отраженной волны, являются: зеркальные отражения, краевые («ползущие») и поверхностные («бегущие») волны. При этом наибольшую роль играют «ползущие» волны. Суммарное же поле отраженной волны формируется в результате интерференции между полями «ползущей» и зеркально рассеянной волн. Главные источники рассеяния в резонансной зоне имеют локализованный характер.

Таким образом, рассмотрение особенностей отражения ЭМВ от целей при различных соотношениях k и a показывает, что отраженный от цели сигнал несет не только информацию о координатах и параметрах движения целей, но и о тонкой структуре цели особенностях ее формы, геометрии и т.п.

2.2. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

Все радиолокационные цели можно разделить на три большие группы: точечные (простые и сложные), сосредоточенные и распределенные. Под точечными обычно понимают цели, которые находятся полностью в пределах главного луча диаграммы направленности антенны РЛС и элементов разрешения по дальности и скорости. Понятие «точечная» цель не связано с геометрическими размерами цели, а обусловлено, главным образом, расстоянием до нее. Так, например, летательный аппарат, находящийся на большом удалении от РЛС представляет собой точечную цель. К точечным целям относят и другие объекты, размеры которых меньше указанных параметров разрешения РЛС. К сосредоточенным относят цели, которые также целиком находятся в пределах элементов разрешения РЛС, но имеют много центров отражения «блестящих» точек. Примером сосредоточенной цели может служить группа летательных аппаратов, расстояние от которых до РЛС таково, что они все попадают в пределы разрешаемого объема РЛС. Обычно при отнесении цели к сосредоточенной задаются линейными параметрами (ℓ_x, ℓ_y, ℓ_z) разрешаемого объема, который определяется параметрами излученного сигнала и шириной диаграммы направленности антенны РЛС. Тогда при выполнении условий

$$\ell_x > \ell_{\text{ц}}, \ell_y > \ell_{\text{ц}}, \ell_z > \ell_{\text{ц}}, \quad (2.1)$$

где $\ell_{\text{ц}}$ – характерный размер цели, любая цель (групповая или одиночная) рассматривается как сосредоточенная.

Когда условие (2.1) не выполняется, то есть размеры цели таковы, что по любому из измеряемых параметров размер $\ell_{\text{ц}}$ цели больше соответствующего размера элемента разрешения, то цель считается распределенной. Примерами распределенных целей могут служить земная или водная поверхность, облака, области дождя, снега или тумана, либо искусственные образования в виде облака дипольных отражателей. Распределенные или множественные цели делятся на поверхностные, когда цель представляет собой поверхность, заполненную отражателями, например поверхность земли, и на объемные, когда цель представляет собой некоторый объем, за-

полненный отражателями. Например, дождевое облако.

В зависимости от геометрической формы цели, а также материала, из которого она изготовлена, все цели делятся на простые и сложные.

К простым относятся цели, имеющие простую геометрическую форму (например, шар, цилиндр, параболоид вращения) и выполненные из однородного материала. Все остальные цели относятся к сложным. Для простых точечных целей характерным является постоянство амплитуды отраженного сигнала при изменении угла наблюдения цели в значительных пределах. Кроме того, фазовый фронт отраженной радиоволны является сферическим.

Реальные объекты радиолокационного наблюдения относятся, как правило, к сложным целям. Данные цели состоят из отдельных частей, которые при облучении их падающей волной формируют практически независимые друг от друга отраженные сигналы. Сигналы, отраженные от сложной цели, можно представить в виде суммы независимых отражений от отдельных центров отражения («блестящих» точек) (см. п. 2.1). Причем результирующий сигнал изменяется, как правило, по амплитуде и фазе в зависимости от изменения пространственного положения центров отражения цели относительно РЛС. Фазовый фронт отраженной от сложной цели волны имеет сложную форму (структуру) и существенно отличается от сферического.

2.3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

1. Эффективная площадь отражения цели

Важной радиолокационной характеристикой цели является «эффективная площадь отражения» (ЭПО). ЭПО является энергетической характеристикой цели. Данная характеристика представляет собой размерный коэффициент пропорциональности между плотностью потока мощности падающей волны ρ_n в точке расположения цели и отраженной от нее мощностью $P_{отр}$ в предположении, что это

мощность переизлучается во все стороны равномерно (то есть цель является изотропным излучателем).

Дадим определение ЭПО. Под ЭПО понимают площадь некоторой фиктивной плоской поверхности, расположенной нормально к направлению падающей плоской волны и являющейся идеальным и изотропным переизлучателем, которая, будучи помещенной в точку расположения цели, создает у антенны РЛС такую же плотность потока мощности, что и реальная цель. Обозначают ЭПО обычно через $\sigma_{\text{ц}}$.

Из определения ЭПО следует, что мощность отраженной от цели волны равна

$$P_{\text{отр}} = \rho_{\text{ц}} \sigma_{\text{ц}}, \quad (2.2)$$

где $\rho_{\text{ц}}$ — плотность потока мощности падающей на цель волны. Тогда, считая, что цель переизлучает падающую на нее волну изотропно, получаем

$$\rho_{\text{отр}} = \frac{P_{\text{отр}}}{4\pi D^2}, \quad (2.3)$$

где $\rho_{\text{отр}}$ — плотность потока мощности отраженной волны в точке расположения РЛС, отстоящей от цели на расстояние D . Если теперь величину $P_{\text{отр}}$ (2.2) подставить в (2.3), а затем найти $\sigma_{\text{ц}}$, то получим

$$\sigma_{\text{ц}} = 4\pi D^2 \frac{\rho_{\text{отр}}}{\rho_{\text{ц}}}. \quad (2.4)$$

Если учесть, что плотности потоков мощности пропорциональны квадратам соответствующих напряженностей электрического поля ЭМВ $E_{\text{отр}}$ и $E_{\text{ц}}$, то

$$\sigma_{\text{ц}} = 4\pi D^2 \frac{E_{\text{отр}}^2}{E_{\text{ц}}^2}, \quad (2.5)$$

где $E_{\text{отр}}^2 \equiv \rho_{\text{отр}}$, $E_{\text{ц}}^2 \equiv \rho_{\text{ц}}$. Выражение (2.3) позволяет определить мощность сигнала $P_{\text{прм}}$, отраженного от цели и воспринимаемого

антенной РЛС с эффективной площадью S_A

$$P_{\text{прм}} = \rho_{\text{отр}} S_A . \quad (2.6)$$

Учитывая (2.2) и (2.3), выражение (2.6) можно переписать в виде

$$P_{\text{прм}} = \frac{\rho_{\text{п}} \sigma_{\text{ц}} S_A}{4\pi D^2} . \quad (2.7)$$

Но плотность потока $\rho_{\text{п}}$ падающей волны при известной дальности D до цели связана с мощностью $P_{\text{изл}}$ излучения РЛС и коэффициентом направленного действия G ее антенны выражением

$$\rho_{\text{п}} = \frac{P_{\text{изл}} G}{4\pi D^2} . \quad (2.8)$$

Следовательно, $P_{\text{прм}}$ можно представить как

$$P_{\text{прм}} = K_0 \sigma_{\text{ц}} , \quad (2.9)$$

где

$$K_0 = \frac{P_{\text{изл}} G S_A}{(4\pi)^2 D^4} . \quad (2.10)$$

Таким образом мощность $P_{\text{прм}}$ принимаемого сигнала, при фиксированных $P_{\text{изл}}$, S_A , G и дальности D , пропорциональна ЭПО цели. Амплитуда же напряжения на согласованной нагрузке приемника пропорциональна корню квадратному из принимаемой мощности, следовательно,

$$U_m \equiv \sqrt{P_{\text{прм}}} = \sqrt{K_0 \sigma_{\text{ц}}} \equiv \sqrt{\sigma_{\text{ц}}} . \quad (2.11)$$

Поскольку реальные цели являются сложными, то для получения ЭПО проводят лабораторные или полигонные испытания, позволяющие экспериментально определить ЭПО цели, например, самолетов. Для простых целей ЭПО можно определить аналитически.

Из определения ЭПО следует, что размерность ее – м^2 . Однако часто в справочниках ЭПО цели приводят в относительных величинах (в децибелах):

$$\sigma_{ц[дБ]} = 10 \lg \left(\frac{\sigma_{ц[М^2]}}{\sigma_{ц0[М^2]}} \right),$$

где $\sigma_{ц0}$ – ЭПО цели в 1 м^2 .

2. Определение ЭПО простых точечных целей

ЭПО выпуклой поверхности. Будем считать, что РЛС облучает хорошо проводящую выпуклую поверхность S (рис. 2.4). Для определения ЭПО такой поверхности, как это следует из выражения (2.5), необходимо определить отношение $E_{отр}^2 / E_{п}^2$. Полагая, что поле отраженной волны является результатом суммирования элементарных полей в точке расположения РЛС, создаваемых отраженными сигналами от элементов dS поверхности, можно записать, что напряженность поля $E_{отр}$ отраженной волны в месте расположения РЛС

$$E_{отр} = \frac{1}{\lambda} \int_S \frac{E_{п}}{D} \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} D \right) \right\} \cos \theta ds, \quad (2.12)$$

где D – дальность до элемента dS поверхности S (рис. 2.4); θ – угол между направлением «РЛС – dS » и нормалью \vec{n} к элементу dS ; $E_{п}$ – напряженность поля падающей волны. Для малоразмерных (точечных) целей можно считать, что в пределах цели (поверхности S) значения D и $E_{п}$ меняются незначительно, поэтому

$$E_{отр} = \frac{E_{п}}{\lambda D} \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} D_0 \right) \right\} \int_S \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} d \right) \right\} \cos \theta ds, \quad (2.13)$$

где D_0 – расстояние от РЛС до ближайшей точки выпуклой поверхности S ; d – расстояние в пределах поверхности S от ближайшей точки до элемента ds (рис. 2.4), $D = D_0 + d$.

Отсюда модуль отношения

$$\begin{aligned} \left| \frac{E_{\text{орт}}}{E_{\text{н}}} \right| &= \left| \frac{1}{\lambda D} \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} D_0 \right) \right\} \int_S \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} d \right) \right\} \cos \theta ds \right| = \\ &= \frac{1}{\lambda D} \left| \int_S \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} d \right) \right\} \cos \theta ds \right|. \end{aligned} \quad (2.14)$$

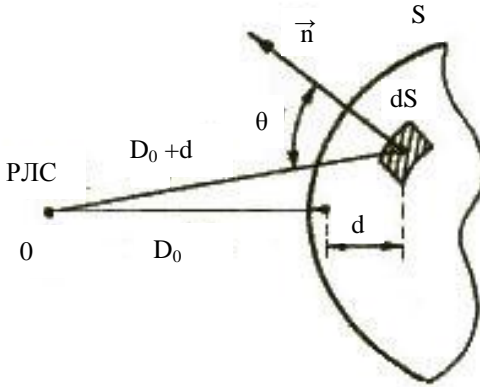


Рис. 2.4.

Подставив (2.14) в (2.5), получим, что ЭПО выпуклой поверхности равна

$$\sigma_{\text{вп}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_S \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} d \right) \right\} \cos \theta ds \right|^2. \quad (2.15)$$

Если предположить, что облучается металлическая пластина с размерами a и $b \gg \lambda$, но a и $b \ll D$, а направление облучения совпадает с нормалью \vec{n} , тогда из (2.15) следует

$$\sigma_{\text{пл}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_S \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} d \right) \right\} \cos \theta ds \right|^2 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_S ds \right|^2 = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{\text{пл}}^2, \quad (2.16)$$

где $S_{\text{пл}}$ – геометрическая площадь пластины.

При написании (2.16) учитывалось, что $\theta=0$ и $d=0$ (вследствие малости размеров пластины по сравнению с D и ее нормального расположения к направлению прихода радиоволны).

Пример1: *определить ЭПО металлической пластины площадью $S_{\text{пл}}=1\text{м}^2$, облучаемой по нормали к ней радиоволной с длиной волны $\lambda=10\text{см}$.*

Воспользовавшись выражением (2.16), получаем

$$\sigma_{\text{ц}} = \frac{4 \times 3,14 \times 1}{(10 \times 10^{-2})^2} = 1256 \text{ м}^2.$$

Следовательно, при геометрической площади пластины 1м^2 и нормальном ее облучении ЭПО пластины равна 1256 м.

Данный пример показывает, что, несмотря на совпадение размерности площади фигуры (пластины) и ЭПО, ЭПО не является мерой площади цели, а служит ее энергетической характеристикой. Поэтому, как отмечалось ранее, величина ЭПО определяет величину мощности принимаемого сигнала и в конечном итоге амплитуду принимаемого сигнала на нагрузке приемника РЛС (см. (2.11)).

К результату (2.16) можно прийти и другим путем. Поскольку площадь пластины $S_{\text{пл}}$, то при облучении ее нормально плоской волной, создающей в месте расположения пластины плотность потока мощности $\rho_{\text{п}}$, на пластину падает мощность $\rho_{\text{п}} S_{\text{пл}}$. При этом в пластине наводятся токи равной амплитуды, совпадающие по фазе в любой ее точке. В этом случае пластина эквивалентна идеальной синфазной антенне с апертурой площадью $S_{\text{пл}}$ и с коэффициентом усиления $G = 4\pi S_{\text{пл}} / \lambda^2$. Плотность же потока в точке расположения РЛС

$$\rho_{\text{отр}} = \frac{\rho_{\text{п}} S_{\text{пл}}}{4\pi D^2} G = \frac{\rho_{\text{п}} S_{\text{пл}}^2}{\lambda^2 D^2}.$$

Используя соотношение (2.4), получаем

$$\sigma_{\text{пл}} = 4\pi D^2 \frac{\rho_{\text{отр}}}{\rho_{\text{п}}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{\text{пл}}^2. \quad (2.17)$$

ЭПО шара. Будем считать, что целью является металлический шар, радиус которого $r \gg \lambda$. Для определения ЭПО такой цели можно воспользоваться выражением (2.15), которое после интегрирования приводит к результату

$$\sigma_{\text{ш}} = \pi r^2. \quad (2.18)$$

Однако к данному результату можно прийти, если вспомнить, что отражающая способность выпуклой поверхности второго порядка, какой является и шар, определяется, главным образом, первой зоной Френеля.

В общем случае, когда выпуклая поверхность имеет двойную кривизну с радиусами r_1 и r_2 , ЭПО такой поверхности (первой зоны Френеля) равна

$$\sigma_{\text{сфр}} = \pi r_1 r_2. \quad (2.19)$$

Благодаря тому, что ЭПО шара определяется только площадью его поперечного сечения и не зависит от направления облучения и длины волны, облучающих его, большой шар с хорошо проводящей поверхностью используется в качестве эталона при экспериментальном измерении ЭПО реальных целей.

ЭПО уголкового отражателя. В ряде случаев, например, при создании ложных целей или экспериментальных радиолокационных измерений, либо при применении пассивных радиолокационных маяков, требуется создание интенсивного вторичного излучения в широком секторе углов облучения. Для решения данной задачи используются искусственные отражатели, которые называются уголковыми.

Обычно уголкового отражателя состоит из трех взаимно перпендикулярных металлических листов и обладает свойством отражения радиоволн в сторону облучающей РЛС. Это объясняется многократным отражением падающей ЭМВ от стенок уголкового отражателя, в случае, когда направление облучения вблизи оси симметрии отражателя.

Из рис. 2.5,а видно, что трехкратное отражение ЭМВ проис-

ходит, если падающий луч проходит в пределах шестиугольника, вписанного во внешний контур отражателя. Следовательно, ЭПО углового отражателя примерно равна ЭПО плоского листа в виде шестиугольника, сторона которого равна $a\sqrt{2}$, где a – длина ребра отражателя. Тогда, используя (2.15), получим

$$\sigma_{yo} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left(\frac{a^4}{3} \right). \quad (2.20)$$

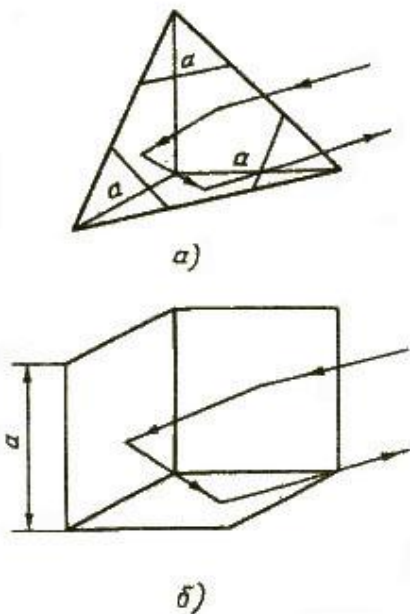


Рис. 2.5.

В случае, когда грань углового отражателя представляет собой квадрат, сторона которого равна a , ЭПО определяется выражением

$$\sigma_{yo} = \frac{4\pi}{\lambda^2} (3a^4). \quad (2.21)$$

Пример 2: определим ЭПО уголкового отражателя с треугольными гранями, у которого $a=1\text{м}$, и длина волны зондирующих колебаний $\lambda=10\text{см}$.

Учитывая (2.20), получаем

$$\sigma_{yo} = \frac{4 \times 3,14 \times 1}{(10 \times 10^{-2})^2 \times 3} = 419 \text{ м}^2.$$

Из данного примера видно, что ЭПО уголкового отражателя меньше, чем плоского листа с размерами $1\text{м} \times 1\text{м}$. Однако в отличие от плоского листа уголкового отражателя сохраняет большое значение ЭПО в достаточно широком секторе углов наблюдения, в то время как ЭПО листа резко падает при незначительном отклонении направления облучения от нормали.

Необходимо подчеркнуть, что достижение на практике теоретического значения σ_{yo} возможно лишь при высокой точности изготовления уголка, особенно при работе с зондирующими колебаниями $\lambda=3\text{ см}$. Для расширения действующего сектора углов наблюдения применяют составные уголкового отражатели, состоящие из четырех и восьми уголков.

В качестве пассивных радиолокационных маяков на море используют биконические отражатели, составленные из двух одинаковых металлических конусов (рис. 2.6). Если угол между образующими конусов равен 90° , то луч после двукратного отражения от поверхности конусов направляется в сторону облучающей отражатель РЛС. Биконический отражатель обеспечивает большое значение ЭПО, которое сохраняется практически в пределах 360° в плоскости, перпендикулярной к его оси.

Сферическая линза Люнеберга с отражающим экраном. Такая линза обладает свойством отражать падающую на нее энергию электромагнитных волн в том же направлении, с которого приходят и зондирующие колебания. Обычно линза выполняется из диэлектрика с изменяющимся по радиусу коэффициентом преломления (рис. 2.7). Величина ЭПО линзы Люнеберга может быть рассчитана по формуле

$$\sigma_{\text{л}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} (\pi r^2)^2,$$

где r – радиус сферы.

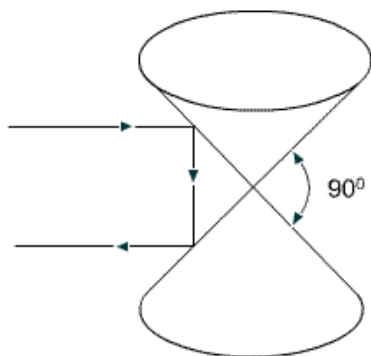


Рис. 2.6.

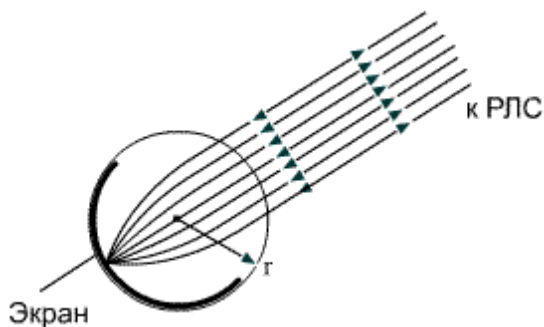


Рис. 2.7.

3. ЭПО сложных точечных целей

Как отмечалось ранее, все реальные объекты радиолокационного наблюдения (самолеты, корабли, автомобили, танки и т.д.) относятся к классу сложных целей. Определение ЭПО таких целей аналитическим способом вызывает затруднения. Приближенные оценки величин ЭПО таких целей можно получить, используя моделирующие комплексы. Однако более точные результаты позволяют получить натурные эксперименты. Поскольку величина ЭПО реаль-

ных целей зависит от условий их наблюдения, которые определяются совокупностью различных факторов, и следовательно, является случайной, то обычно в качестве оценки ЭПО объекта берут его среднее статистическое значение.

Средние статистические ЭПО различных объектов радиолокационного наблюдения приведены в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Цель	ЭПО, м ²
Самолет-истребитель	3...5
Фронтовой бомбардировщик	7...10
Тяжелый бомбардировщик	15...20
Транспортный самолет	40...70
Подводная лодка (в надводном положении)	30...150
Рубка подводной лодки	1...2
Малые суда (водоизмещение 50...200 т)	50...250
Средние корабли (водоизмещение 1000...10000 т)	3000...10000
Большие корабли (водоизмещение более 10000 т)	более 10000
Крейсер	12000...14000
Автомобиль	1...3
Крылатая ракета	0,1...0,3
Самолет, выполненный по технологии «Стелс»	0,001...0,01
Человек	0,8...1,0

4.Определение ЭПО сосредоточенных целей

В качестве сосредоточенной цели рассмотрим цель, состоящую из двух точечных отражателей (рис. 2.8). Такая модель позволит рассмотреть основные закономерности, имеющие место при отражении ЭМВ от реальных объектов радиолокационного наблюдения, у которых в формировании отраженного сигнала участвуют, как правило, несколько блестящих точек.

Будем считать, что цель находится в дальней зоне. Тогда сигналы, отраженные от каждой точечной цели, можно записать в виде

$$u_1 = U_1 e^{j\omega(t-t_{d1})}, \quad u_2 = U_2 e^{j\omega(t-t_{d2})}, \quad (2.22)$$

где $t_{d1} = \frac{2D_1}{c}$ и $t_{d2} = \frac{2D_2}{c}$ – времена запаздывания сигналов, отраженных от точечных целей 1 и 2 соответственно (рис. 2.8).

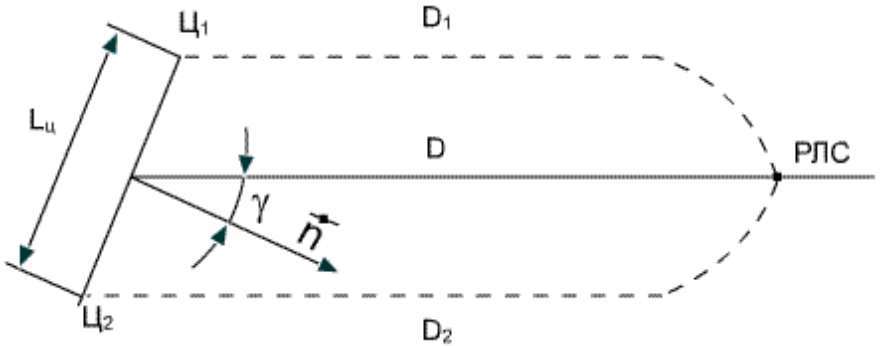


Рис. 2.8.

Если ввести комплексные амплитуды отраженных волн, то выражения (2.22) можно переписать в виде

$$u_1 = U_1 e^{j\omega t} \quad \text{и} \quad u_2 = U_2 e^{j\omega t},$$

где $U_1 = U_{01} e^{-j\varphi_1}$ и $U_2 = U_{02} e^{-j\varphi_2}$ – комплексные амплитуды, а $\varphi_1 = \omega t_{d1}$ и $\varphi_2 = \omega t_{d2}$ – фазы отраженных радиоволн.

Сигналы, отраженные от каждой точечной цели, в точке расположения РЛС суммируются и, следовательно, комплексная амплитуда суммарного поля равна

$$U_{\text{сум}} = U_1 + U_2 = U_{01} e^{-j\varphi_1} + U_{02} e^{-j\varphi_2}.$$

Отсюда амплитуда отраженной волны равна

$$U_{\text{сум}} = \left| U_{01} e^{-j\varphi_1} + U_{02} e^{-j\varphi_2} \right| = \sqrt{U_{01}^2 + U_{02}^2 + 2U_{01}U_{02} \cos \varphi_{12}}, \quad (2.23)$$

где $\varphi_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} (D_2 - D_1) = \frac{4\pi}{\lambda} L_{\text{ц}} \sin \gamma$ – разность фаз при-

нимаемых колебаний от отдельных отражателей (точечных целей).

Так как суммарная амплитуда (2.23) пропорциональна ЭПО сложной цели (см. (2.11)), то получим

$$\sigma_{\text{ц}} = \sigma_{\text{ц1}} + \sigma_{\text{ц2}} + 2\sqrt{\sigma_{\text{ц1}}\sigma_{\text{ц2}}} \cos\varphi_{12}. \quad (2.24)$$

Таким образом, как это следует из выражения (2.24) ЭПО двухточечной цели изменяется в зависимости от ракурса ее наблюдения (угла γ). Причем она может быть как больше суммы ЭПО каждой точечной цели в отдельности, так и меньше данной величины. Если $\sigma_{\text{ц1}} = \sigma_{\text{ц2}} = \sigma_{\text{ц0}}$, то (2.24) можно записать в более простом виде

$$\sigma_{\text{ц}} = 2\sigma_{\text{ц0}} \left(1 + \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} L_{\text{ц}} \sin \gamma \right) \right) = 4\sigma_{\text{ц0}} \cos^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} L_{\text{ц}} \sin \gamma \right). \quad (2.25)$$

Анализ (2.25) показывает, что диаграмма обратного рассеяния ($\sigma_{\text{ц}}(\gamma)$) является многолепестковой : нули функции $\sigma_{\text{ц}}(\gamma)$ соответствуют направлениям, где отражения от элементов цели находятся в противофазе, а максимумы – в направлениях синфазного сложения. Причем при синфазном сложении результирующая ЭПО $\sigma_{\text{ц макс}} = (\sqrt{\sigma_{\text{ц1}}} + \sqrt{\sigma_{\text{ц2}}})^2$ и при $\sigma_{\text{ц1}} = \sigma_{\text{ц2}}$ в четыре раза превышает ЭПО каждой цели. При противофазном сложении результирующая ЭПО $\sigma_{\text{ц мин}} = (\sqrt{\sigma_{\text{ц1}}} - \sqrt{\sigma_{\text{ц2}}})^2$ и при $\sigma_{\text{ц1}} = \sigma_{\text{ц2}}$ равна нулю. Изрезанность диаграммы обратного рассеяния $\sigma_{\text{ц}}(\gamma)$ тем сильнее, чем больше отношение базы $L_{\text{ц}}$ цели к длине волны λ .

Если сосредоточенная цель состоит из N отражателей, то результирующая амплитуда отраженного сигнала в точке расположения РЛС равна

$$U_{\text{р}} = \left| \sum_{i=1}^N U_i e^{j\varphi_i} \right|, \quad (2.26)$$

где φ_i – фаза отраженного сигнала, количественно равная

$$\varphi_i = \frac{4\pi}{\lambda} D_i, \quad (2.27)$$

где D_i – расстояние до i -го отражателя от РЛС.

Для определения ЭПО, как это следует из (2.11) и (2.26), необходимо найти квадрат модуля комплексной амплитуды результирующего сигнала U_p^2 :

$$\sigma_p = U_p^2 \frac{1}{K_0}. \quad (2.28)$$

В результате имеем

$$\begin{aligned} U_p^2 &= \left| \sum_{i=1}^N U_i e^{j\varphi_i} \right|^2 = \left(\sum_{i=1}^N U_i e^{j\varphi_i} \right) \left(\sum_{i=1}^N U_i e^{-j\varphi_i} \right) = \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N U_i U_j e^{j(\varphi_i - \varphi_j)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N U_i U_j \cos(\varphi_i - \varphi_j). \end{aligned} \quad (2.29)$$

Заметим, что количество слагаемых равно N . Поэтому выражение (2.29) можно переписать в виде

$$U_p^2 = \sum_{i=1}^N U_i^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N U_i U_j \cos(\varphi_i - \varphi_j), \quad (2.30)$$

где $j \neq i$ и $j < i$.

Если учесть, что $U_p^2 = K_0 \sigma_p$ и $U_i^2 = K_0 \sigma_i$ (см. (2.28)), то получим

$$\sigma_p = \sum_{i=1}^N \sigma_{\text{ш}} + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sqrt{\sigma_i} \sqrt{\sigma_j} \cos(\varphi_i - \varphi_j), \quad (2.31)$$

где также $j \neq i$ и $j < i$.

Небольшие случайные движения цели приводят к случайным изменениям разности фаз $(\varphi_i - \varphi_j)$ и в результате этого возникают значительные изменения амплитуд отраженных сигналов и величины ЭПО.

Если разность фаз $(\varphi_i - \varphi_j)$ равновероятна в интервале $[0, \pi]$, то среднее значение косинуса $\cos(\varphi_i - \varphi_j) = 0$. Поэтому среднее значение ЭПО можно записать в виде

$$\sigma_{p \text{ ср}} = \sum_{i=1}^N \sigma_i. \quad (2.32)$$

Из выражения (2.32) следует, что для нахождения ЭПО множественной цели необходимо знать общее число N элементарных отражателей и величины их ЭПО. Однако на практике трудно определить как общее число отражателей, участвующих в формировании отраженной волны от множественной цели, так и сами величины σ_i . Поэтому для преодоления этой неопределенности при нахождении ЭПО множественных (распределенных) целей обычно оперируют с удельными величинами ЭПО.

5. Определение ЭПО пространственных (распределенных) целей

При определении ЭПО пространственных целей необходимо учитывать, что данные цели в общем случае состоят из большого числа отражателей, расположение которых как относительно РЛС, так и относительно друг друга является случайным. Примером такой цели, например, может служить облако дипольных отражателей. Ориентация диполей в пространстве как относительно друг друга, так и относительно РЛС, ведущей наблюдение, из-за турбулентности атмосферы случайна. Вследствие случайности расположения элементарных отражателей, фаза сигналов, отраженных от них, равновероятна в интервале $[-\pi, \pi]$, а амплитуда сигналов является случайной величиной.

Для определения ЭПО множественной цели можно воспользоваться выражением (2.31). Однако необходимо учесть случайный характер σ_i , обусловленный случайной величиной σ_i , так и разностью $(\varphi_i - \varphi_j)$. Поэтому, выполнив в (2.31) усреднение по всем возможным значениям фаз φ_i, φ_j и ЭПО σ_i , получим

$$\sigma_{p \text{ ср}} = \bar{\sigma}_{ц p} = \sum_{i=1}^N \bar{\sigma}_i, \quad (2.33)$$

где $\bar{\sigma}_i$ – среднее значение ЭПО i -го элементарного отражателя, образующего множественную цель; N – количество элементарных отражателей в одновременно отражающем объеме (или площади).

Одновременно отражающий объем (площадь). При рассмотрении распределенных целей важным понятием является так называемый «одновременно отражающий объем» («одновременно отражающая площадь»). При распространении радиолокационного сигнала, имеющего длительность $\tau_{и}$, в пределах распределенной цели электромагнитное поле в каждый данный момент занимает в пространстве по дальности участок, равный $\Delta D_{и} = c\tau_{и}$, а по угловым координатам этот участок пространства определяется шириной главного луча ДН антенны РЛС. В результате отражения сигнала от отдельных отражателей (элементов) распределенной цели к РЛС, в каждый данный момент времени, поступает суммарный сигнал, который соответствует одновременно накладывающимся сигналам, отраженным от отражателей, расположенных в пределах половины участка $\Delta D_{и}$. Это объясняется эффектом «догона» более поздними частями сигнала более ранних, которые отражались от отражателей, расположенных на большем расстоянии. С помощью графика, приведенного на рис. 2.9, поясняется эффект «догона». На оси D показан участок распределенной цели. Каждый отражатель на рис. 2.9 представлен горизонтальной линией. Путь распространения каждого элемента сигнала τ_0 показан в виде прямой, наклон которой определяется скоростью распространения радиоволн c . Видно, что при наблюдении отраженного сигнала в точку \sum одновременно поступают сигналы от всех отражателей в полосе δD :

$$\delta D = \frac{c\tau_{и}}{2}. \quad (2.34)$$

Фазы всех сигналов случайны и зависят от положения отражателей по дальности. Следовательно, результирующий сигнал равен векторной сумме отражений от всех отражателей в пределах *одновременно отражающего объема*.

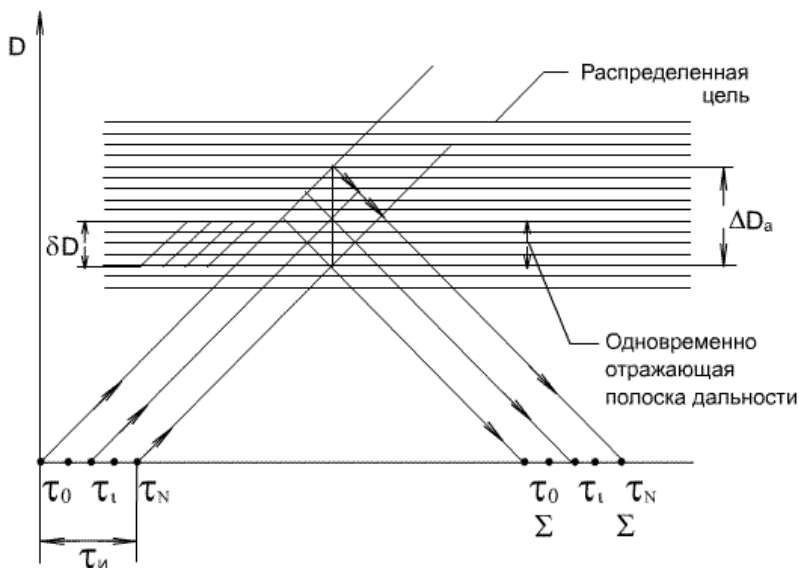


Рис. 2.9.

Одновременно отражающей областью поверхностно распределенной цели является поверхность этой цели, попадающей в одновременно отражающий объем.

Таким образом, для определения среднего значения ЭПО множественной (пространственной) цели необходимо знать величины средних значений ЭПО элементарных отражателей, входящих в данную цель, и их количество. Однако такой путь определения ЭПО на практике неприемлем, так как даже при известной величине $\bar{\sigma}_i$ невозможно практически подсчитать количество отражателей N , входящих в распределенную цель. Для удобства расчета ЭПО распределенной цели вводят дополнительный параметр – удельную эффективную площадь отражения $\sigma_{уд}$, которая представляет собой ЭПО единицы объема (1 м^3) или площади (1 м^2) распределенной цели.

В этом случае среднее значение ЭПО распределенной цели равно произведению удельной ЭПО на величину объема $V_{обл}$ или площади $S_{обл}$ одновременно отражающей области

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{рц}} &= \sigma_{\text{уд}} V_{\text{обл}}; \\ \sigma_{\text{рц}} &= \sigma_{\text{уд}} S_{\text{обл}}.\end{aligned}\quad (2.35)$$

Удельная ЭПО поверхностно-распределенных целей. К поверхностно распределенным целям относятся различные участки земной и водной поверхности. Например, лес, кустарник, пашня, морская поверхность. Если считать, что отдельные однородные элементарные отражатели распределены на поверхности земли (моря) в среднем равномерно, то

$$\sigma_{\text{уд пв}} = \frac{\sigma_{\text{пв}}}{S}, \quad (2.36)$$

где S – площадь одновременно отражающей поверхности; $\sigma_{\text{пв}}$ – ЭПО поверхностной цели.

Как видно из (2.36), удельная ЭПО поверхностно-распределенных целей является безразмерной величиной ($\text{м}^2/\text{м}^2$).

Обычно на практике при определении ЭПО поверхностных целей пользуются усредненными значениями удельных ЭПО, которые, как правило, получают экспериментальным путем. Величина $\sigma_{\text{уд пв}}$ зависит от длины волны зондирующих колебаний, поляризации ЭМВ, угла падения (скольжения) излучаемых антенной РЛС радиоволн, диэлектрической проницаемости отражателей и их размеров. Соотношение между длиной волны λ и размером (высотой) отражателя позволяет определить степень шероховатости отражающей поверхности, а следовательно, характер отражения поверхностной цели (см.п.2.1). Например, при зеркальном характере отражения наибольшее значение удельная ЭПО имеет при падении радиоволн в направлении, близком к нормальному. При увеличении угла падения (уменьшении угла скольжения) удельная ЭПО уменьшается при диффузном (ламбертовском) законе отражения. В соответствии с этим законом отношение удельной ЭПО к синусу угла скольжения β почти постоянно в широком диапазоне углов β :

$$\frac{\sigma_{\text{уд пв}}}{\sin \beta} = \sigma_{\text{уд}0}, \quad (2.37)$$

где $\sigma_{\text{уд}0}$ – относительная величина $\sigma_{\text{уд пв}}$.

Рассмотрим более подробно особенности отражения радиолокационных сигналов от земной и морской поверхностей. Для этого рассмотрим отдельно, как изменяется удельная ЭПО $\sigma_{\text{уд пв}}$ в зависимости от перечисленных выше факторов.

Как правило, участки поверхности земли можно разделить на четыре типа: гладкая (песчаная поверхность, озера, асфальтированная и бетонная поверхности); смешанная (холмистая местность с отдельными участками леса, с небольшим числом сооружений); нерегулярная (гористая и лесистая местности); городская местность.

Характер отражений от любого типа поверхности, помимо перечисленных выше (длины волны зондирующих колебаний (рабочей частоты f_0 передатчика РЛС), поляризации ЭМВ, электрических характеристик отражающей поверхности, условий наблюдения поверхности (угла скольжения β)), зависит также и от изменения характеристик местности, вызываемых климатическими и метеорологическими условиями.

Величина удельной ЭПО для любого типа поверхности обычно увеличивается с ростом f_0 (уменьшением λ). Изменения же величины $\sigma_{\text{уд}}$ от угла скольжения β различны в зависимости от величины данного угла. Так, при изменении β в пределах от 0° до 10° величина удельной ЭПО растет для любого типа поверхности, однако в дальнейшем, когда β изменяется от 10° до 50° , величина удельной ЭПО практически не зависит от угла β , что подтверждается результатами экспериментальных исследований. При дальнейшем увеличении угла β происходит резкое увеличение $\sigma_{\text{уд пв}}$. На рис. 2.10 приведены зависимости $\sigma_{\text{уд пв}}$, полученные по результатам обработки экспериментальных данных для различных земных поверхностей при малых углах скольжения ($0^\circ < \beta < 45^\circ$).

Исследования влияния поляризации зондирующих ЭМВ на величину $\sigma_{\text{уд пв}}$ показали, что для большинства типов местности данный параметр не оказывает существенного влияния. Однако в целом при горизонтальной поляризации значения $\sigma_{\text{уд пв}}$ оказываются меньшими, чем при вертикальной. Для неровной поверхности разница может составлять до 5дБ.

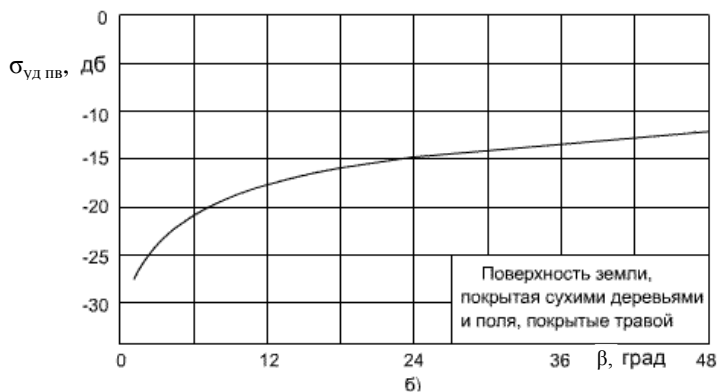
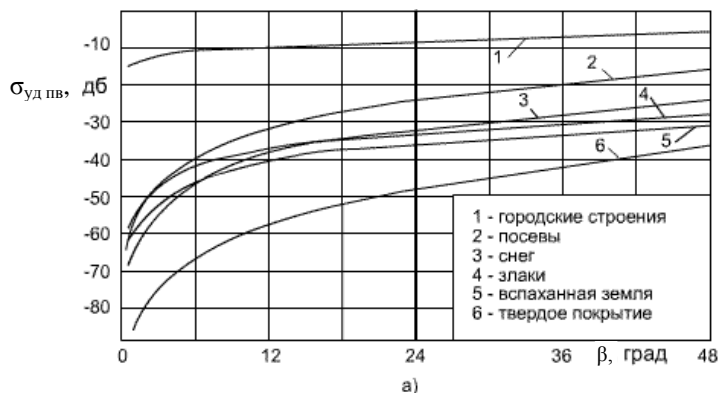


Рис. 2.10.

Для неровной поверхности, например холмистой местности, воздействие дождя зависит от количества растительности на ней. В результате экспериментальных исследований установлено, что во время дождя величина $\sigma_{уд}$ такой поверхности уменьшается в диапазоне 3см примерно на 7дБ. Кроме того, интенсивность отражений пропорциональна биомассе растений, особенно при наклонном падении радиоволн.

Воздействие снега на отраженный сигнал зависит от количества воды, содержащейся в снеге. Поэтому можно утверждать, что снег вызывает такое же уменьшение $\sigma_{уд пв}$, как и дождь (на 9-10дБ).

Кроме того, необходимо учитывать, что значительно изменяется характер отражения при уменьшении длительности зондирующих импульсов. Так как уменьшение данного параметра сигнала приводит к усилению влияния тех отражающих областей поверхности земли, которые характеризуются зеркальными отражениями, а также тех, которые дают стабильный отраженный сигнал при любых условиях. Другими словами, мощные точечные отражатели, которые ранее маскировались отражениями от других элементарных отражателей в пределах площади S , оказываются изолированными при уменьшении длительности зондирующих импульсов.

Удельная ЭПО морской поверхности. Отражения радиолокационного сигнала от морской поверхности определяется состоянием поверхности моря, зависящим от различных атмосферных факторов, наиболее важным из которых является ветер. Как видно из рис. 2.11, наибольшей величина удельной ЭПО $\sigma_{уд}$ морской поверхности имеет место при сильном волнении моря, а наименьшая – при слабом.

Помимо состояния моря важным фактором, влияющим на характер отражения, является угол скольжения β . На рис. 2.12 приведена типичная зависимость $\sigma_{уд.пв}$ от угла β (данная зависимость имеет место и при отражении от шероховатой земной поверхности). Здесь можно выделить три характерные области: I – область зеркальных отражений, которая обусловлена элементами волн, размеры которых превышают длину волны λ зондирующих колебаний РЛС ($50^\circ \dots 53^\circ < \beta < 90^\circ$). Для нее характерно увеличение $\sigma_{уд.пв}$ при росте величины угла β . II – область, в которой отраженный сигнал формируется главным образом за счет отражений от капиллярных и гравитационных волн, длина которых соизмерима с λ ($10^\circ \dots 12^\circ < \beta < 50^\circ \dots 53^\circ$). Характерной особенностью данной области является практически постоянное значение величины $\sigma_{уд.пв}$; III – область, в которой наблюдается резкое уменьшение удельной ЭПО при уменьшении угла β .

Совместное влияние на величину $\sigma_{уд.пв}$ изменения угла скольжения β , различных состояний морской поверхности и длины

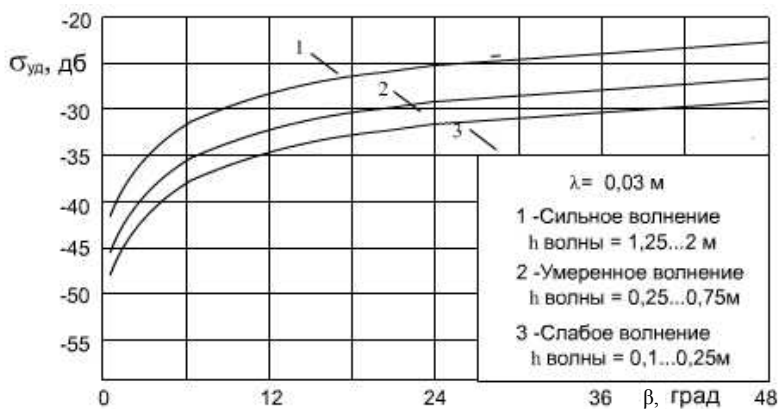


Рис. 2.11

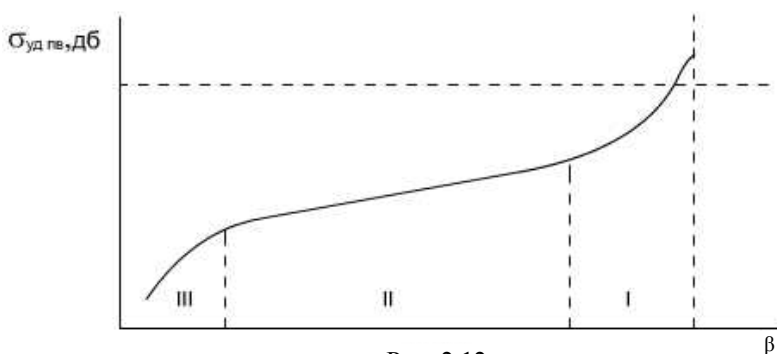


Рис. 2.12.

волны приведено на рис. 2.13. Волнение моря указано по шкале Бофорта, которая устанавливает соответствие между скоростью ветра и состоянием поверхности моря и имеет 13 градаций силы волнения.

На характер отражений от морской поверхности, кроме того, оказывает поляризация ЭММ, несущая частота f_0 зондирующих колебаний, направление облучения волн на поверхности моря («по ветру», «против ветра» и т.д.).

Исследование влияния поляризации ЭМК на величину $\sigma_{уд}$ морской поверхности показали, что для углов $\beta > 60^\circ$ поляризация

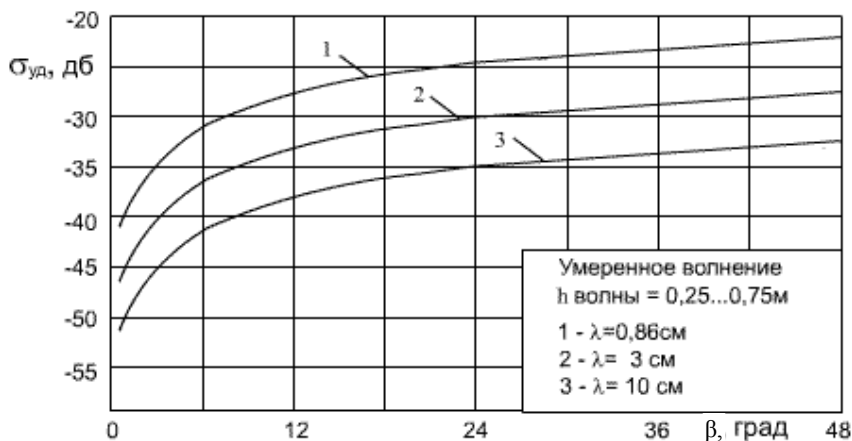


Рис. 2.13.

практически не оказывает влияния на отражательную способность. При малых углах β горизонтальная поляризация дает заметно меньшие величины $\sigma_{уд}$, чем вертикальная. Это различие уменьшается с ростом β и усиления волнения моря.

Удельная ЭПО объемно-распределенных целей. К объемно-распределенным целям, как отмечалось ранее, относят гидрометеорообразования (облака, дождь, град, снег), а также искусственные образования – облака дипольных отражателей, служащие источниками пассивных помех для РЛС. Все перечисленные цели представляют собой совокупность большого числа элементарных частиц, распределенных случайным образом. Сигналы, отраженные от отдельных частиц (элементов), можно рассматривать как независимые случайные величины. В этом случае удельную ЭПО для объемно – распределенной цели, характеризующую ЭПО единицы объема, можно представить в виде

$$\sigma_{уд\ об} = \sum_{i=1}^{N_1} \sigma_{\psi i} \approx N_1 \bar{\sigma}_{\psi 0}, \quad (2.38)$$

где $\sigma_{\psi i}$ – среднее значение ЭПО отдельных частиц; N_1 – количество элементарных отражателей в единице объема; $\bar{\sigma}_{\psi 0}$ – среднее значе-

ние ЭПО частиц при условии, что все они одинаковы. В отличие от $\sigma_{\text{уд пв}}$ удельная ЭПО объемной цели является размерной величиной ($\text{м}^2/\text{м}^3=1/\text{м}$).

Каждую отдельную частицу, входящую в объемную цель, можно рассматривать как сферу, диаметр которой $d_i \ll \lambda$ (капли дождя, например, имеют диаметр 0,01-0,6 см, частица туч и тумана – $<0,01$ см).

Удельная ЭПО метеообразований зависит как от интенсивности формирования данных образований, так и длины волны зондирующих ЭМВ. На рис. 2.14 приведены зависимости $\sigma_{\text{уд об}}$ для тумана и облачности в зависимости от дальности видимости в тумане для двух значений λ , а на рис. 2.15 зависимость удельной ЭПО дождя от его интенсивности для трех значений λ : 0,9; 3,0 и 10,0 см.

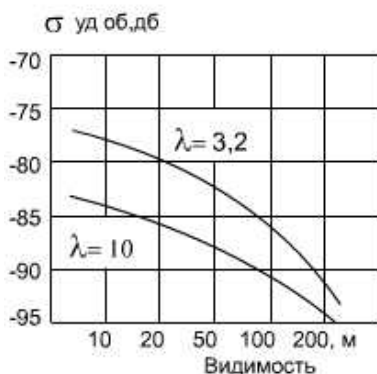


Рис. 2.14.

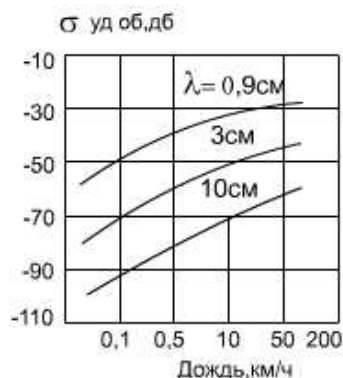


Рис. 2.15.

При расчете ЭПО облака дипольных отражателей в качестве удельной ЭПО широко используют выражение

$$\sigma_{\text{уд дп}} = N_1 \bar{\sigma}_{\text{дп}} = 0,17\lambda^2 N_1,$$

где $\bar{\sigma}_{\text{дп}} = 0,17\lambda^2$ – среднее значение ЭПО полуволновых вибраторов при произвольной их ориентации в пространстве. При отклонении длины диполей от половины длины волны зондирующих колебаний

РЛС $\sigma_{уд\text{ дп}}$ уменьшается, что приведет к уменьшению ЭПО объемной цели, а следовательно, к снижению эффективности маскирующего действия диполей.

ЭПО объемной цели определяется аналогично ЭПО поверхностной цели:

$$\sigma_{ц\text{ об}} = \sigma_{уд\text{ об}} V_o, \quad (2.39)$$

где V_o – одновременно отражающий объем. При полном заполнении луча гидрометеорообразованиями (диполями) объем V_o легко найти из простых геометрических построений. При импульсном режиме работы и ширине главного луча ДНА РЛС θ_A одновременно отражающий объем V_o представляет собой усеченный конус, высота которого $ct_{и}/2$, где $t_{и}$ – длительность зондирующих импульсов (рис. 2.16).

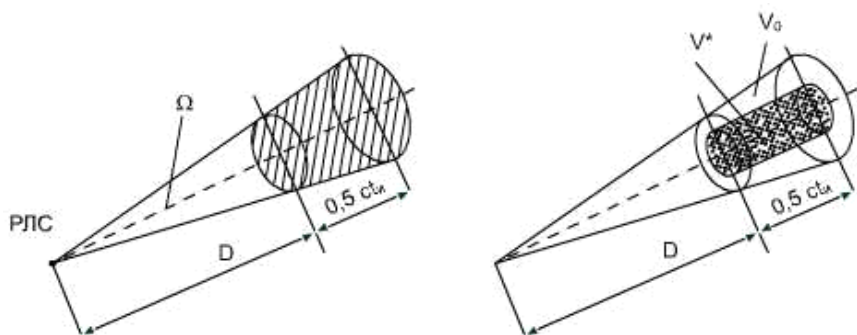


Рис. 2.16.

Однако на большом удалении от цели всегда выполняется соотношение $D \gg ct_{и}/2$ (где D – расстояние, РЛС – цель), позволяющее считать импульсный объем V_o цилиндром с высотой $ct_{и}/2$ и основанием ΩD^2 .

Тогда можно записать

$$V_o = \Omega D^2 ct_{и}/2, \quad (2.40)$$

где $\Omega = \frac{4\pi}{G}$ – телесный угол, занимаемый главным лучом ДНА; G – коэффициент направленного действия антенны РЛС.

Учитывая (2.40), получаем выражение для $\sigma_{ц\ об}$ в виде

$$\sigma_{ц\ об} = \frac{2\pi}{G} D^2 c t_{и} \sigma_{уд\ об}. \quad (2.41)$$

Часто при выполнении расчетов $\sigma_{ц\ об}$ используют не величину G , а ширину главного луча ДН в вертикальной и горизонтальной плоскостях $\theta_{АГ}$ и $\theta_{АВ}$ на уровне половинной мощности. Тогда КНД принимает вид

$$G = \frac{4\pi}{\theta_{АГ} \theta_{АВ}}. \quad (2.42)$$

Учитывая (2.42), выражение (2.41) можно преобразовать к виду

$$\sigma_{ц\ об} = D^2 \theta_{АГ} \theta_{АВ} \frac{c t_{и}}{2} \sigma_{уд\ об}. \quad (2.43)$$

2.4. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

1. Плотность распределения вероятностей амплитуд отраженных сигналов

При рассмотрении статистических характеристик отраженных сигналов обычно используют одну из двух моделей сложной цели. Во-первых, отражатели, образующие цель, обладают одинаковыми свойствами или, во-вторых, имеется область цели, которая дает стабильный отраженный сигнал, доминирующий над остальными. Первая модель описывает сильно флюктуирующую цель, а вторая – слабо флюктуирующую цель. Поскольку первая модель является част-

ным случаем второй, когда отсутствует стабильный сигнал, то остановимся на рассмотрении второй модели.

Ситуация, описываемая второй моделью, характерна для случая наблюдения одиночного интенсивно и стабильно отражающего объекта на фоне отражений от земной поверхности. Поскольку при движении носителя РЛС амплитуды и фазы отдельных отражателей испытывают случайные изменения, за исключением сигнала отраженного «блестящей» точкой, то результирующий сигнал можно представить в виде

$$u_p = U_0 \cos(\omega t) + \sum_{i=1}^N U_i \cos(\omega t - \varphi_i), \quad (2.44)$$

где U_0 – амплитуда сигнала от «блестящей» точки; U_i – амплитуда сигнала, отраженного от i -го отражателя.

Выражение (2.44) можно записать в виде

$$u_p = U_0 \cos(\omega t) + U_c \cos(\omega t - \varphi_c), \quad (2.45)$$

где U_c – результирующая амплитуда случайных составляющих;

φ_c – результирующая фаза случайных составляющих.

Представим случайную компоненту в (2.45) через ее ортогональные составляющие

$$\begin{aligned} u_c &= \sum_{i=1}^N U_i \cos(\omega t - \varphi_i) = U_c \cos(\omega t - \varphi_c) = \\ &= U_{c1} \cos(\omega t) + U_{c2} \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (2.46)$$

где U_{c1} и U_{c2} – амплитуды случайных ортогональных составляющих, определяемые выражениями

$$U_{c1} = \sum_{i=1}^N U_i \cos \varphi_i \quad \text{и} \quad U_{c2} = \sum_{i=1}^N U_i \sin \varphi_i. \quad (2.47)$$

Тогда результирующую амплитуду U_c и фазу φ_c случайных составляющих можно представить в виде

$$U_c = \sqrt{U_{c1}^2 + U_{c2}^2} \quad \text{и} \quad \varphi_c = \frac{\sum_{i=1}^N U_i \sin \varphi_i}{\sum_{i=1}^N U_i \cos \varphi_i}. \quad (2.48)$$

Учитывая, что фаза косинусной составляющей в (2.46) совпадает с фазой сигнала от «блестящей» точки, векторную диаграмму формирования амплитуды U и фазы φ_c результирующего сигнала можно представить в виде, изображенном на рис. 2.17, а его мгновенное значение – выражением

$$u_p = U \cos(\omega t - \varphi). \quad (2.49)$$

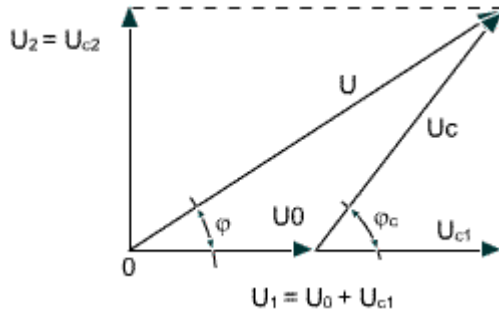


Рис. 2.17.

При изменении относительного положения цели и РЛС будут меняться расстояния до элементарных отражателей и, следовательно, изменяться фазовые соотношения между отраженными от них сигналами, а это приведет к случайным изменениям как амплитуды, так и фазы отраженных сигналов. Следовательно, будут случайным образом меняться и амплитуды ортогональных составляющих U_{c1} и U_{c2} . Каждая из составляющих есть результат сложения большого числа элементарных сигналов. Тогда в силу центральной предельной теоремы теории вероятностей случайные амплитуды U_{c1} и U_{c2} , как представляющие собой суммы большого числа независимых случайных величин (2.47), будут распределены по нормальному закону.

Причем, исходя из симметрии разложения (2.46), можно полагать, что $M\{U_{c1}\}=M\{U_{c2}\}=0$ и $M\{U_{c1}^2\}=M\{U_{c2}^2\}=\sigma_U$. Тогда, учитывая (2.45) и векторную диаграмму рис. 2.17, распределение амплитуд ортогональных составляющих $U_1=U_0+U_{c1}$ и $U_2=U_{c2}$ можно записать в виде

$$p(U_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_U^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_U^2}(U_1-U_0)^2\right\},$$

$$p(U_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_U^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma_U^2}U_2^2\right\}. \quad (2.50)$$

А так как $U=\sqrt{U_1^2+U_2^2}$, то закон распределения амплитуды результирующего сигнала (2.49) можно представить в виде

$$p(U) = \frac{1}{\sigma_U^2} \exp\left(-\frac{U^2+U_0^2}{2\sigma_U^2}\right) I_0\left(\frac{UU_0}{\sigma_U^2}\right), \quad (2.51)$$

где $I_0\left(\frac{UU_0}{\sigma_U^2}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\left(-\frac{UU_0 \cos \varphi}{\sigma_U^2}\right) d\varphi$ – функция Бесселя I -го рода нулевого порядка. Функция $I_0(x)$ характерна тем, что при $x=0$ она равна единице, а при $x \gg 1$ справедливо асимптотическое выражение $I_0(x) \approx e^x / \sqrt{2\pi x}$. Распределение (2.51), как известно, представляет собой обобщенное распределение Релея или распределение Райса.

Важным для практики случаем является отсутствие большой по амплитуде составляющей, то есть когда $U_0=0$. В этом случае закон распределения вероятностей амплитуд результирующего сигнала описывается простым распределением Релея

$$p(U) = \frac{1}{\sigma_U^2} \exp\left(-\frac{U^2}{2\sigma_U^2}\right). \quad (2.52)$$

Релеевское распределение амплитуды отраженного сигнала характерно, например, для распределенных целей типа земной поверхности, покрытой густой растительностью. Флюктуация амплитуды сигнала в этом случае обусловлена главным образом перемещением отражателей под действием ветра.

Хотя релеевское распределение достаточно полно описывает флюктуации амплитуды отраженных сигналов от сложных и распределенных целей, в некоторых практически важных ситуациях распределение вероятностей амплитуд отраженных сигналов отличается от релеевской.

2. Плотность распределения вероятностей ЭПО цели

Дисперсия σ_U^2 , входящая в выражения (2.50) – (2.52), по своему физическому смыслу представляет собой среднее значение мощности суммы сигналов случайных отражателей. Следовательно, σ_U^2 численно равна среднему значению мощности результирующего сигнала, отраженного от цели, то есть $\sigma_U^2 = P_{\text{ср}}/2$. Поэтому, исходя из равенства соответствующих друг другу элементов вероятности появления амплитуды U и соответствующей ей мощности P

$$p(U)d(U) = p(P)d(P)$$

и учитывая выражение (2.52), можно записать

$$p(P)d(P) = \frac{1}{\sigma_U^2} \exp\left(-\frac{U^2}{2\sigma_U^2}\right) d(U). \quad (2.53)$$

Кроме того, учитывая, что $2p(U)d(U) = d(U^2)$, получаем $d(P) = U d(U)$. Следовательно, плотность распределения вероятностей мощности результирующего отраженного сигнала можно запи-

сать в виде (подставив в (2.53) $\sigma_U^2 = P_{\text{ср}} / 2$)

$$p(P) = \frac{1}{P_{\text{ср}}} \exp\left(-\frac{P}{P_{\text{ср}}}\right). \quad (2.54)$$

Так как результирующая мощность P пропорциональна результирующей ЭПО цели, последняя будет также иметь экспоненциальное распределение

$$p(\sigma) = \frac{1}{\sigma_{\text{ср}}} \exp\left(-\frac{\sigma}{\sigma_{\text{ср}}}\right), \quad (2.55)$$

где $\sigma_{\text{ср}}$ – среднее значение результирующей ЭПО цели. Причем ЭПО σ превышает среднее значение с вероятностью 0,37, а с вероятностью 0,5 (то есть половину времени наблюдения) $\sigma > 0,7\sigma_{\text{ср}}$.

При наличии в отраженном сигнале преобладающей составляющей распределение ЭПО цели можно записать в виде

$$p(\sigma) = \frac{4\sigma}{\sigma_{\text{ср}}^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\sigma_{\text{ср}}}\right). \quad (2.56)$$

3. Корреляционная функция и спектральная плотность отраженного сигнала

Кроме распределения вероятностей амплитуды, мощности и ЭПО цели, большую роль при анализе эффективности радиолокационных систем и устройств играют корреляционная функция и спектральная плотность флуктуаций отраженных сигналов. В частности, форма спектра пассивных помех имеет принципиальное значение для решения вопроса о выборе способа оптимальной обработки радиолокационных сигналов в системах обнаружения и сопровождения движущихся целей, а при заданном способе обработки – для определения его эффективности.

Найдем корреляционную функцию флуктуаций результирующего сигнала, отраженного от сложной либо распределенной цели.

Для этого представим комплексную амплитуду результирующего отраженного сигнала в виде

$$U_p(t) = \sum_{i=1}^N U_i(t) = \sum_{i=1}^N U_i(t) e^{j\varphi_i(t)}, \quad (2.57)$$

где $U_i(t)$ и $\varphi_i(t)$ – соответственно амплитуда и фаза сигнала, отраженного от элементарного отражателя; $\varphi_i(t) = \frac{4\pi D_i(t)}{\lambda}$; D_i – расстояние от точки расположения РЛС до элементарного i -го отражателя. Тогда по определению

$$\begin{aligned} K(t_1, t_2) &= M \{U(t_1)U^*(t_2)\} = \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N M \{U_i(t_1) e^{j\varphi_i(t_1)} U_k(t_2) e^{-j\varphi_k(t_2)}\} = \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N M \{U_i(t_1) U_k(t_2) \exp \{j[\varphi_i(t_1) - \varphi_k(t_2)]\}\}. \end{aligned} \quad (2.58)$$

Так как $U_i(t)$, $U_k(t)$, $\varphi_i(t)$ и $\varphi_k(t)$ являются независимыми случайными величинами при несовпадающих номерах ($i \neq k$), то сумма всех членов с несовпадающими номерами равна нулю. Поэтому (2.58) можно записать в виде

$$K(t_1, t_2) = \sum_{i=1}^N M \{U_i(t_1) U_i(t_2) \exp \{j[\varphi_i(t_1) - \varphi_i(t_2)]\}\}. \quad (2.59)$$

С учетом того, что составляющие, входящие в $K(t_1, t_2)$, являются однородными в статическом смысле, выражение (2.59) можно представить в виде

$$K(t_1, t_2) = N P_{\text{ср } \varphi_0} M \{\exp \{j[\varphi_{\varphi_0}(t_1) - \varphi_{\varphi_0}(t_2)]\}\}, \quad (2.60)$$

где $P_{\text{ср } \varphi_0} = M \{U_{\varphi_0}^2\}$ – средняя мощность сигнала, отраженного типовым элементарным отражателем; $\varphi_{\varphi_0}(t)$ – фаза сигнала, отражен-

ного типовым элементарным отражателем.

Если учесть, что $P_{\text{cp}} = NP_{\text{cp } \text{эо}}$ – средняя мощность результирующего радиолокационного сигнала, получим нормированную корреляционную функцию вида

$$k(t_1, t_2) = \frac{K(t_1, t_2)}{P_{\text{cp}}} = M \left\{ \exp \left\{ j [\varphi_{\text{эо}}(t_1) - \varphi_{\text{эо}}(t_2)] \right\} \right\}. \quad (2.61)$$

Учитывая, что фаза $\varphi_{\text{эо}}(t)$ связана с дальностью $D_{\text{эо}}$ до типового отражателя, входящего в цель, изменение фазы результирующего сигнала за время Δt можно представить в виде

$$\Delta \varphi(t_1, t_2) = \frac{4\pi}{\lambda} [D_{\text{эо}}(t_1) - D_{\text{эо}}(t_2)] = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta D_{\text{эо}}(t_1, t_2), \quad (2.62)$$

где $\Delta D_{\text{эо}}(t_1, t_2)$ – смещение элементарных отражателей за время $\Delta t = t_1 - t_2$.

На величину $\Delta D_{\text{эо}}$ может влиять разнообразное количество факторов, поэтому результирующее смещение можно представить в виде

$$\Delta D_{\text{эо}}(t_1, t_2) = \sum_{i=1}^M \Delta D_{\text{эо } i}(t_1, t_2), \quad (2.63)$$

где M – количество факторов, влияющих на результирующий сдвиг; $\Delta D_{\text{эо } i}$ – частный сдвиг элементарных отражателей. Подставляя (2.63) в (2.62), получим

$$k(t_1, t_2) = M \left\{ \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{i=1}^M \Delta D_{\text{эо } i}(t_1, t_2) \right\} \right\}. \quad (2.64)$$

Если все частные смещения элементов цели считать независимыми, то (2.64) можно представить в виде

$$k(t_1, t_2) = \prod_{i=1}^M k_i(t_1, t_2), \quad (2.65)$$

где

$$k_i(t_1, t_2) = M \left\{ \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta D_{\text{зо } i}(t_1, t_2) \right\} \right\} \quad (2.66)$$

является частной нормированной функцией корреляции.

Таким образом, нормированная корреляционная функция комплексной амплитуды результирующего сигнала, отраженного от распределенной (сложной) цели, может быть представлена в виде произведения частных корреляционных функций, каждая из которых учитывает какой-либо один фактор, приводящий к флуктуациям результирующего отраженного сигнала.

Пример 3: Пусть имеется распределенная цель в виде облака дипольных отражателей. Случайная скорость перемещения отдельного диполя в пределах облака равна $V_{\text{дп}}$. Распределение скоростей отдельного отражателя описывается нормальным законом со средним $M\{V_{\text{дп}}\} = 0$ и дисперсией $M\{V_{\text{дп}}^2\} = \sigma_v^2$. Найдем корреляционную функцию комплексной амплитуды результирующего сигнала, отраженного от облака дипольных отражателей, $k_{\text{сб}}(\tau)$ обусловленную собственным случайным перемещением отражателей по формуле (2.66).

Для решения данной проблемы, во-первых, представим смещение дипольных отражателей за время $\Delta t = t_2 - t_1$ в виде

$$\Delta D_{\text{дп}} = V_{\text{дп}} \Delta t = \Delta D_{\text{зо}}. \quad (2.67)$$

Во-вторых, подставим (2.67) в формулу (2.66) и, учитывая, что $\Delta t = \tau$, получаем

$$k_{\text{сб}}(\tau) = M \left\{ \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta D_{\text{дп}}(\tau) \right\} \right\} = \int_{-\infty}^{\infty} p(V_{\text{дп}}) \exp \left\{ j \frac{4\pi}{\lambda} V_{\text{дп}}(\tau) \right\} dV_{\text{дп}} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_v^2}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{V_{\text{дп}}^2}{\sigma_v^2}} e^{j \frac{4\pi}{\lambda} V_{\text{дп}} \tau} dV_{\text{дп}}.$$

или окончательно получим

$$k_{\text{сб}}(\tau) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{\lambda} \sigma_v \right)^2 \tau^2 \right\}. \quad (2.68)$$

Из формулы (2.68) видно, что корреляционная функция флюктуацией комплексной амплитуды тем шире, чем меньше среднеквадратическое значение σ_v , скорости перемещения дипольного отражателя и больше длина волны зондирующих колебаний. Выражение (2.68) может быть использовано при определении корреляционных функций флюктуаций отраженных сигналов от множественных и сложных целей.

Случайные флюктуации амплитуды и фазы отраженных сигналов зависят как от отражающих свойств распределенных целей и ориентации их относительно носителя РЛС, так и от параметров самой РЛС, а именно: от положения элементарных отражателей в пространстве и характера их собственных движений, от формы ДН антенной системы и ее ориентации относительно вектора скорости носителя, от формы зондирующего сигнала и поляризации, от законов движения носителя и сканирования антенны РЛС. Кроме того, к указанным факторам необходимо добавить и влияние внешней среды – состояние атмосферы, ее турбулентность, возникающие вибрации в процессе работы двигателя ЛА и т.п.

Экспериментальные исследования показывают, что корреляционная функция флюктуаций амплитуды сигнала, отраженного от самолета, может быть записана в виде

$$k_{\kappa}(\tau) = e^{-\frac{|\tau|}{\tau_{\kappa}}} \cos(2\pi f_{\text{см}} \tau),$$

где τ_{κ} – параметр, характеризующий корреляцию случайных изме-

нений амплитуды во времени; $f_{\text{см}}$ – частота затухания колебаний корреляционной функции.

Величина τ_k называется временем корреляции. Для самолетов-истребителей величина τ_k находится в пределах 0,3...1,0 с, а частота $f_{\text{см}}$ – в пределах 2...10 Гц (при $\lambda=3\text{см}$).

Спектральную плотность флуктуаций $S_{\text{фл}}(f)$ отраженных сигналов от сложной или распределенной цели можно найти по корреляционной функции, если воспользоваться известным соотношением Винера-Хинчина, связывающим $S_{\text{фл}}(f)$ и $k(\tau)$ через преобразование Фурье. В частности, используя (2.68), можно найти спектральную плотность флуктуаций комплексной амплитуды сигнала, обусловленную случайным перемещением отражателей, входящих в распределенную цель. Исходя из соотношения Винера-Хинчина, запишем

$$S_{\text{фл}}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} k_{\text{сб}}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{4\pi}{\lambda}\sigma_v\right)^2 \tau^2} e^{-j2\pi f\tau} d\tau = S_0 \exp\left(-\frac{f^2}{2\Delta f_{\text{фл}}^2}\right), \quad (2.69)$$

где S_0 – спектральная плотность при $f=0$, определяемая выражением

$$S_0 = \frac{\lambda}{\sqrt{6\pi}\sigma_v^2}; \quad (2.70)$$

$\Delta f_{\text{фл}}$ – ширина спектра флуктуаций, равная

$$\Delta f_{\text{фл}} = \frac{2\sigma_v}{\lambda}. \quad (2.71)$$

При этом видно, что величина $\Delta f_{\text{фл}}$ характеризует среднеквадратическое изменение доплеровского смещения частоты $\sigma_{f_{\text{дп}}}$ в отраженном сигнале от распределенной цели при среднеквадратическом отклонении собственных скоростей перемещения отражателей,

равном σ_v , то есть $\Delta f_{\text{фл}} = \sigma_{f_{\text{дп}}}$.

В многочисленных работах показано, что спектральную плотность флюктуаций сигналов, отраженных от широкого класса распределенных целей, также можно представить гауссовским законом аналогично выражению (2.69).

Из выражения (2.71) следует, что чем меньше длина волны, тем шире спектр флюктуаций $\Delta f_{\text{фл}}$. Часто основное влияние на ширину спектра оказывает ветер. Чем больше скорость ветра, тем интенсивнее разброс скоростей отражателей (среднеквадратическое значение σ_v).

Т а б л и ц а 2.2

Среднеквадратические значения разброса скоростей
отражателей распределенных целей

Тип цели	σ_v , м/с
Редкий лес (безветрие)	2
Местность, покрытая растительностью, при ветре:	
– 20 км/ч	4–7
– 50 км/ч	12–15
– 70 км/ч	33–40
Морская поверхность при ветре 15–37 км/ч	70–100
Преднамеренные пассивные дипольные помехи при ветре	
– 5–20 км/ч	40–90
– 50 км/ч	100–130
Дождевые облака	200–400

В табл. 2.2 приведены характерные значения σ_v , найденные экспериментально. При известной длине волны λ и величине σ_v из табл. 2.2 можно, опираясь на выражение (2.71), вычислить ширину спектра флюктуаций.

2.5. ФЛЮКТУАЦИИ ФАЗОВОГО ФРОНТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, ОТРАЖЕННЫХ ОТ СЛОЖНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ

При отражении ЭМВ от точечной цели фазовый фронт отраженной волны является сферической поверхностью и описывается уравнением $\frac{4\pi}{\lambda} D = \text{const}$. В случае сложной цели результирующий

отраженный сигнал формируется путем суммирования сигналов, отраженных элементарными отражателями («блестящими точками»), составляющими цель. При этом фазовый фронт отраженной суммарной волны будет отличаться от сферического.

Основные закономерности, которые присущи изменениям фазового фронта волны, отраженной от сложной цели, рассмотрим на примере цели, состоящей из двух точечных целей (рис. 2.18).

Будем считать, что расстояние от РЛС до центра базы $L_{\text{ц}}$ равно D . Тогда комплексную амплитуду результирующего поля отраженной волны от двухточечной цели в точке расположения РЛС можно представить в виде

$$\begin{aligned} U_{\text{сум}} &= U_1 e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(D-\frac{\Delta D}{2}\right)} + U_2 e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}\left(D+\frac{\Delta D}{2}\right)} = \\ &= e^{-j\frac{4\pi}{\lambda}D} \left(U_1 e^{\frac{2\pi}{\lambda}\Delta D} + U_2 e^{-\frac{2\pi}{\lambda}\Delta D} \right) \end{aligned} \quad (2.72)$$

или

$$\begin{aligned} U_{\text{сум}} &= \left[(U_1 + U_2) \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} L_{\text{ц}} \sin \gamma\right) + \right. \\ &\quad \left. + j(U_1 - U_2) \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} L_{\text{ц}} \sin \gamma\right) \right]. \end{aligned} \quad (2.73)$$

Следовательно, фаза комплексной амплитуды результирующего поля имеет вид

$$\varphi_{\text{сум}} = \frac{4\pi}{\lambda} D + \arctg \left[\frac{(U_1 - U_2)}{(U_1 + U_2)} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} L_{\text{ц}} \sin \gamma \right) \right]. \quad (2.74)$$

Как видно из (2.74), фаза результирующего поля определяется двумя слагаемыми. Первое соответствует фазовому сдвигу, обусловленному отражениям от некоторой точечной цели, удаленной от РЛС на расстояние D , а второе характеризует дополнительный фазовый сдвиг, обусловленный интерференцией отраженных волн от точечных источников 1 и 2, разнесенных в пространстве на величину $L_{\text{ц}}$ и наблюдаемых РЛС под углом γ .

Из (2.74) следует, что фазовый фронт результирующей волны является несферическим и описывается уравнением

$$\frac{4\pi}{\lambda} D + \arctg \left[\frac{(1-a)}{(1+a)} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} L_{\text{ц}} \sin \gamma \right) \right] = \text{const}, \quad (2.75)$$

где $a = \frac{U_2}{U_1} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{ц2}}}{\sigma_{\text{ц1}}}}$ – отношение амплитуд сигналов, отраженных от целей 1 и 2.

При движении двухточечной цели ориентация ее относительно носителя РЛС будет меняться, а следовательно, будет меняться и фаза результирующего поля в точке расположения РЛС в соответствии с (2.74). Изменение фазы свидетельствует о том, что эквифазная поверхность или фронт отраженной волны искривлен по сравнению со сферическим фронтом волны, отраженной от точечной цели. Так как направление на цель определяется по нормали к фазовому фронту волны, то при определении углового положения двухточечной цели возникают ошибки. Поскольку рассматриваемая цель является упрощенным вариантом реальной цели, у которой число «блестящих» точек значительно больше двух, то аналогичные ошибки возникают при определении углового положения и реальных целей. На рис. 2.18 обозначено: 1 – фазовый фронт точечной цели (в точке O); 2 – касательная к фазовому фронту 1; 3 – касательная к фазовому фронту двухточечной цели (Π_1 и Π_2); 4 – фазовый фронт двухточечной цели.

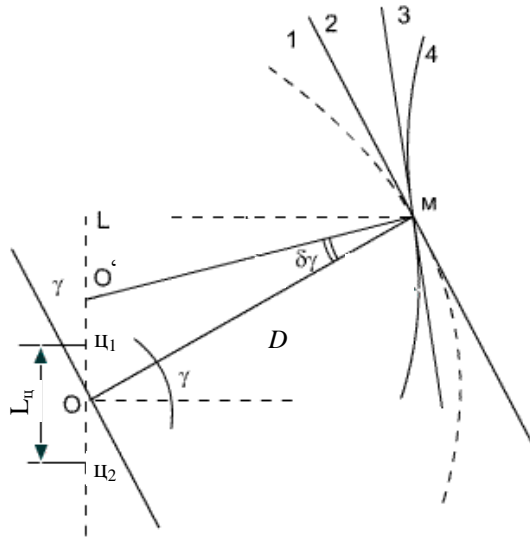


Рис. 2.18.

В соответствии с (2.74) фазу результирующей комплексной амплитуды отраженной волны можно записать как

$$\varphi_{\text{сум}} = \frac{4\pi}{\lambda} D + \Psi(\gamma).$$

При $\Psi(\gamma) = 0$, $\varphi_{\text{сум}} = \frac{4\pi}{\lambda} D$, что характерно для точечной цели.

Дополнительный сдвиг по фазе относительно сферического фронта равен

$$\Psi(\gamma) = \arctg \left[\frac{(1-a)}{(1+a)} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi}{\lambda} L_{\text{ц}} \sin \gamma \right) \right]. \quad (2.76)$$

Имеется кажущийся или эффективный центр отражения (точка O' на рис. 2.18), то есть точку в пределах цели или за ее пределами куда направлена нормаль к волновому фронту отраженной волны в точке расположения РЛС. Отклонение равно углу $\delta\gamma$.

Величина смещения ΔL кажущегося центра отражения относительно центра базы двухточечной цели может быть больше, чем $0,5 L_{ц}$, то есть выходит за пределы габаритов цели. На величину смещения ΔL оказывает влияние соотношение между величинами ЭПО элементарных целей, входящих в двухточечную цель. Например, если $a=0,9$, то эффективный (кажущийся) центр отражения находится в точке, отстоящей от центра базы на 10 габаритов размера цели:

$$\Delta L_{\text{макс}} = \frac{L_{ц}(1+0,9)}{2(1-0,9)} \approx 10L_{ц}.$$

Поскольку, как отмечалось ранее, двухточечная цель является упрощенным вариантом реальной цели, то аналогичные явления будут иметь место и при наблюдении реальных сложных целей, например самолетов или наземных объектов. Как показывают экспериментальные исследования отражений от цели в виде линейного набора отражателей, равномерно распределенных по длине $L_{ц}$, эффективный центр отражения вследствие флуктуаций фазового фронта результирующей отраженной волны примерно в течение 13,4 % времени наблюдения находится вне размера $L_{ц}$ (габаритов цели). Распространяя результаты эксперимента на реальные цели, можно утверждать, что в процессе их наблюдения происходит изменение положения («блуждание») эффективного центра отражения целей. Данные флуктуации, приводящие к ошибкам изменения углового положения цели, называют угловым шумом цели. Угловой шум реальной цели проявляется обычно в виде случайных смещений кажущегося местоположения цели относительно «центра тяжести» распределения ее отражающих участков («блестящих» точек). Причем положение «центра тяжести» будет зависеть от ракурса наблюдения цели.

Как показывают экспериментальные исследования на больших и средних дистанциях угловой шум, выраженный в линейных единицах смещения кажущегося положения цели относительно «центра тяжести» распределения ее отражателей, не зависит от дальности, а среднеквадратическое значение $\sigma_{ц0}$ отклонения эффективного цен-

тра отражения можно определить по формуле

$$\sigma_{\text{цo}} = \frac{R_{\text{ц}}}{\sqrt{2}},$$

где $R_{\text{ц}}$ – эквивалентный радиус случайного расположения отражателей относительно «центра тяжести».

Типичные значения $\sigma_{\text{цo}}$ для реальных целей типа «самолет» находятся в пределах от $0,15 L_{\text{ц}}$ до $0,25 L_{\text{ц}}$. Величина $\sigma_{\text{цo}}$ зависит от характера распределения основных отражающих элементов таких, как двигатели, подвесные баки и т.д. Для самолета с одним двигателем, например самолета-истребителя, при облучении его со стороны носа $\sigma_{\text{цo}} \approx 0,1 L_{\text{ц}}$, а для больших самолетов, имеющих двигатели вне фюзеляжа и топливные баки на консолях крыла, при тех же условиях облучения – $\sigma_{\text{цo}} \approx 0,3 L_{\text{ц}}$. При боковом облучении самолета за счет более равномерного расположения отражателей $\sigma_{\text{цo}} \approx 0,3 L_{\text{ц}}$.

В результате экспериментальных исследований установлено, что спектр угловых шумов цели является низкочастотным и имеет максимальную интенсивность в полосе частот от 0 до 5 Гц.

Поскольку блуждания эффективного центра отражения происходят в пределах некоторого объема, заключающего реальную цель, то кроме флуктуаций по угловым координатам возникают и флуктуации времени прихода отраженного сигнала. Данные флуктуации приводят к ошибкам в определении дальности до цели, которые по аналогии с угловым шумом называют шумом дальности, однако обычно величина этой ошибки не превышает геометрических размеров цели в направлении облучения. В качестве оценки среднеквадратической ошибки $\sigma_{\text{д фл}}$ измерения дальности, обусловленной флуктуациями времени запаздывания, может быть использована величина, равная $(0,1-0,3) L_{\text{ц д}}$, где $L_{\text{ц д}}$ – протяженность цели вдоль координаты «дальность».

Спектральные свойства шумов дальности близки к спектральным свойствам углового шума, то есть шум дальности является низкочастотным, ширина спектра слабо зависит от ракурса наблю-

дения цели, а максимальная интенсивность шумов приходится на полосу от 0 до 5 Гц.

2.6. РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ЗАМЕТНОСТЬ ЦЕЛЕЙ И ПУТИ ЕЕ СНИЖЕНИЯ

Совокупной характеристикой радиолокационных целей является их заметность. Данная характеристика определяет возможность обнаружения целей с помощью РЛС. При этом под радиолокационной заметностью понимают способность целей создавать в точке нахождения РЛС, ведущей наблюдение, плотность потока мощности достаточную для их обнаружения. Как это следует из физических процессов, связанных с отражением радиоволн, радиолокационную заметность целей определяют, главным образом, геометрическая форма, размеры и материал цели, из которого она изготовлена. При этом наибольшую заметность при одинаковых размерах и условиях наблюдения имеет те цели, которые имеют больше изломов, выступов и вогнутых участков, близких к прямому углу, то есть те участки (области) поверхности, которые являются центрами отражения («блестящими» точками) радиоволн. Кроме того, одни и те же цели по-разному ведут себя при облучении их зондирующими сигналами, имеющими разные несущие частоты, так как меняются условия отражения радиоволн. Это позволяет, используя, например, многочастотные РЛС, обнаруживать цели, которые являются «невидимыми» в каком-то одном диапазоне длин радиоволн.

Непосредственно с проблемой заметности радиолокационных целей связана проблема снижения их ЭПО, так как при прочих равных условиях именно эта характеристика цели является определяющей при определении их заметности. Снижение радиолокационной заметности целей позволяет сократить время, необходимое противнику, на принятие решения по уничтожению наблюдаемой цели и тем самым повысить ее живучесть. Опыт применения самолетов со сниженной заметностью, выполненных по технологии «Стелс», показал высокую эффективность данных ЛА при противодействии их РЛС различного назначения.

Снижение ЭПО целей, а следовательно, и их заметности, воз-

можно за счет сокращения (уменьшения) количества центров отражения («блестящих» точек) на поверхности. Ибо данные участки поверхности цели вносят основной вклад в поле отраженной волны.

В связи с этим существуют следующие пути снижения радиолокационной заметности целей:

1) за счет выбора конфигурации объекта, обеспечивающей минимум плотности потока мощности в направлении на облучающую РЛС;

2) за счет использования противорадиолокационных покрытий на поверхности целей (объектов);

3) за счет использования в конструкции целей материалов, поглощающих ЭМВ.

Непосредственно к данным способам снижения радиолокационной заметности целей примыкает и их маскировка с помощью специальных отражателей, имеющих значительные величины ЭПО, которые искажают истинную картину отражения ЭМВ в окрестности прикрываемой цели.

При снижении радиолокационной заметности первым способом конфигурацию выбирают такой, чтобы уменьшить количество центров отражения на ее поверхности, формирующих отраженный от цели сигнал в направлении на облучающую РЛС. Возможно два варианта конфигурации. Первый – особенности конструкции поверхности цели и ее форма таковы, что основная доля энергии падающей волны отражается поверхностью цели в направлениях, несовпадающих с направлением на облучающую РЛС. Второй – конфигурация поверхности цели такова, что падающая на нее волна равномерно рассеивается по ее поверхности и в направлении на облучающую РЛС отражается незначительная доля энергии падающей ЭМВ. Особенности же конструкции поверхности цели, влияющие на формирование поля отраженной волны, стараются уменьшить.

Противорадиолокационные покрытия, использующиеся для снижения ЭПО, могут быть двух типов: поглощающие и интерференционные. Принцип действия первых основан на превращении энергии падающей ЭМВ в тепловую, а вторых – на взаимной компенсации ЭМВ отраженных от поверхности самой цели и противорадиолокационного покрытия. Данные покрытия приводят к значительному уменьшению коэффициента отражения радиоволн, а это, в свою очередь, – к уменьшению плотности потока мощности отра-

женной волны от цели в месте расположения РЛС, ведущей наблюдение.

Для того чтобы в направлении на РЛС отражения от цели не происходило, коэффициент отражения ее поверхности должен быть равен нулю. Лучше всего данному требованию удовлетворяют ферромагнетики, а также материалы, выполненные из смеси частиц поглощающего вещества и изолированные немагнитным диэлектриком.

Однослойные поглощающие покрытия обеспечивают поглощение радиоволн метрового и дециметрового диапазонов. В сантиметровом диапазоне наиболее эффективны многослойные покрытия с переменными от слоя к слою параметрами. Первый слой радиопоглощающего материала, как правило, делают рельефным. Наиболее удобен рельеф в виде пирамид с углом при вершине $30^\circ \dots 60^\circ$ (рис. 2.19). Такая конфигурация покрытия обеспечивает многократные переотражения, увеличивающие поглощения падающей волны. Для уменьшения коэффициента отражения на 20 дБ высота h пирамид должна быть $(0,5 \dots 0,6)\lambda$. Для снижения же коэффициента отражения на 50 дБ уже необходимо, чтобы $h = (7 \dots 10)\lambda$.

Для уменьшения толщины покрытия (высоты h) можно использовать интерференционные покрытия (рис. 2.20). При выборе толщины d покрытия, равной $0,25\lambda$, имеет место противофазность колебаний, отраженных от поверхности покрытия и объекта, а в случае равенства амплитуд достигается полное уничтожение отражения (взаимная компенсация волн отраженных от поверхности покрытия и поверхности объекта $E_{\text{отр}2}$) (см. рис. 2.20)).

Для расширения диапазона частот ЭМВ, на которых эффективны интерференционные покрытия, их делают многослойными. Причем толщина каждого слоя выбирается из условий поглощения радиоволн определенной длины. Для реализации интерференционных покрытий обычно используют материалы, полученные из смеси каучука и карбонильного железа.

Противорадиолокационная маскировка позволяет исказить наблюдаемую истинную воздушную или наземную обстановку. Используемые для этих целей различные отражатели изменяют интенсивность, создавая ложные цели или, наоборот, затемняя наблюдаемые объекты. Например, слабоотражающие водные поверхности, по-

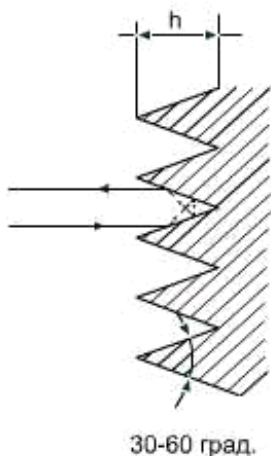


Рис. 2.19.

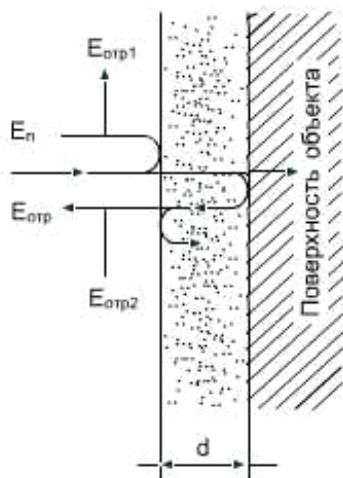


Рис. 2.20.

верхности бетонированных шоссе, рулевых дорожек и взлетно-посадочных полос аэродромов могут быть замаскированы группами уголкового отражателей, установленных на поплавках, на специальных штангах или подвешены на тросах. При этом на радиолокационном изображении искажается конфигурация береговой черты, образуются ложные острова или полуострова, ликвидируются заливы, озера, реки, автострады и т.д. Кроме того, для маскировки целей могут использоваться естественные средства, например растительность или неровности рельефа местности, которые затеняют прикрываемые объекты, искажая реальную обстановку. Из сказанного следует, что маскировка целей может осуществляться как с помощью искусственных отражателей, так и естественных. В качестве искусственных отражателей обычно выступают различные уголкового отражатели, линзы Люнберга, полуволновые вибраторы или диполи. Эффективность маскировки целей повышается при групповом использовании уголкового отражателей, объединенных в группы по четыре или восемь штук. Так как ЭПО данных отражателей велика и слабо зависит от направления облучения, то использование уголкового от-

ражателей позволяет имитировать как точечные, так и распределенные цели. Поэтому данные отражатели используются как для маскировки воздушных, так и наземных (морских) целей.

Для маскировки воздушных целей, например самолетов, обычно используются дипольные отражатели.

Способы снижения радиолокационной заметности целей требуют для получения адекватной радиолокационной картины окружающей обстановки больших затрат мощности излучения зондирующих сигналов и более чувствительных приемных устройств РЛС для решения задач обнаружения, разрешения, распознавания и идентификации целей, а также измерения их координат и параметров движения.

2.7. ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ

1. Каковы причины и от чего зависит характер вторичного излучения различных целей?

2. Поясните термин «блестящая точка цели»?

3. Какие радиолокационные цели относятся к «точечным», «сосредоточенным» и «распределенным»?

4. Что такое одновременно отражающий объем?

5. Какие радиолокационные характеристики целей Вам известны?

6. Дайте определение ЭПО цели.

7. От чего зависит величина ЭПО радиолокационных целей?

8. Определите мощность $P_{\text{прм}}$ сигнала, отраженного от цели типа самолета-истребителя, в точке расположения облучающей ее РЛС, если известно: дальность до цели $D=50$ км, средняя мощность ПРД РЛС $P_{\text{ср}}=80$ Вт, диаметр зеркала антенны РЛС $d_A=80$ см, длина волны зондирующих колебаний $\lambda=3$ см.

9. Определите ЭПО металлической пластины размером 3×4 м, которая облучается по нормали к ней РЛС с $\lambda=2,8$ см. Изменится ли величина ЭПО данной пластины и на сколько, если угол облучения будет равен 30 градусов?

10. Определите величину ЭПО двухточечной цели, если из-

вестно: $\sigma_{ц1}=3 \text{ м}^2$, $\sigma_{ц2}=10 \text{ м}^2$, расстояние между точечными целями $L_{ц}=10 \text{ м}$, длина волны зондирующих колебаний $\lambda=3 \text{ см}$, угол наблюдения $\theta_{ц}=30$ градусов. Определите также максимальную и минимальную величины ЭПО данной цели.

11. Что необходимо знать для того, чтобы определить величины ЭПО поверхностной и объемной распределенных целей?

12. Определите величину ЭПО участка вспаханного поля, наблюдаемого с помощью РЛС самолета, если известны: высота полета $H_{п}=5 \text{ км}$, дальность до наблюдаемого участка $D_{п}=40 \text{ км}$, длительность зондирующих импульсов $t_{и}=1 \text{ мкс}$, ширина луча антенны РЛС в горизонтальной и вертикальной плоскостях 3 градуса, длина волны зондирующих колебаний $\lambda=10 \text{ см}$.

13. Определите ЭПО облака дипольных отражателей, наблюдаемого РЛС на удалении 80 км , если известны: диаметр зеркала антенны $d_A=60 \text{ см}$, длина волны зондирующих колебаний $\lambda=3 \text{ см}$, длительность зондирующих импульсов $t_{и}=1,5 \text{ мкс}$, плотность дипольных отражателей $250/\text{м}^3$.

14. Что является причиной флуктуаций мощности отраженного сигнала от цели и ее ЭПО?

15. Зависит ли закон распределения флуктуаций мощности отраженного сигнала от цели и ее ЭПО от условий наблюдения и параметров зондирующего сигнала?

16. От чего зависят спектральные характеристики флуктуаций сигналов, отраженных от сложных и распределенных целей?

17. Что такое эффективный центр отражения цели?

18. Поясните причину возникновения углового шума цели.

19. Что такое шум дальности цели?

20. Что понимают под радиолокационной заметностью целей?