

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ЗЕМЛИ ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ НИЗКОЛЕТЯЩИХ ЦЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ДВУХПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

© 2016

**С. А. Воронцова** аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, [cbeta116@mail.ru](mailto:cbeta116@mail.ru)

Выявлено, что применение двухпозиционного режима работы радиолокационной станции снижает мощность мешающих отражений за счёт уменьшения количества и площади элементов земной поверхности, отражающих зондирующий сигнал. Мощность этих отражений в значительной степени определяет отношение сигнал/шум на входе приёмника бортовой радиолокационной станции и, как следствие, вероятность правильного обнаружения целей и точность определения их координат. На основе анализа особенностей формирования отражающих участков земной поверхности получены все возможные конфигурации этих участков и аналитические выражения для расчёта их площадей. В результате исследования получены специфические для двухпозиционной радиолокационной станции аналитические выражения и графики линий равных дальностей (изодоп) и линий равных доплеровских частот (изодоп), формирующих эти зоны. Это позволило разработать универсальный алгоритм расчёта мощности мешающих отражений при обнаружении низколетящих целей, пригодный для сравнительного анализа мощности отражений и характеристик обнаружения при различных конфигурациях взаимного расположения носителей приёмника, передатчика и цели, а также для сравнения характеристик обнаружения однопозиционной и двухпозиционной радиолокационных станций. В соответствии с этим алгоритмом проведены расчёты и построены графики зависимостей мощности мешающих отражений в полосе пропускания доплеровских фильтров от частоты их настройки, полученные в результате расчётов для однопозиционной и двухпозиционной радиолокационных станций.

*Конфигурация участка мешающих отражений, площадь участка мешающих отражений, мощность мешающих отражений, поверхность Земли, двухпозиционная радиолокация, низколетящие воздушные цели, линии равных дальностей, линии равных доплеровских частот, высокая частота повторения импульсов.*

Цитирование: Воронцова С.А. Анализ особенностей формирования мешающих отражений от Земли при обнаружении низколетящих целей с помощью двухпозиционной радиолокационной станции // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 3. С. 131-142.  
DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-131-142

### Введение

Обнаружение низколетящих воздушных целей (ВЦ) бортовым радиолокатором сопровождается поступлением на вход приёмника мешающих отражений от подстилающей поверхности, мощность которых зачастую превышает мощность полезного сигнала, отражённого от цели. Это делает невозможным обнаружение целей в случаях, когда спектры мешающих отражений (МО) и сигналов от цели пересекаются. На рис. 1 изображён спектр сигналов на входе приёмника радиолокационной станции (РЛС), перемещающейся параллельно подстилающей поверхности [1].

Применение высокой частоты повторения импульсов  $F_n$  оказывается наиболее целесообразным в такой ситуации.

Преимущества импульсно-доплеровских РЛС заключаются в большом частотном интервале доплеровских приращений, свободном от мешающих отражений, и отсутствии зон «слепых» скоростей в отличие от РЛС с низкой частотой повторения. Важным преимуществом РЛС с высокой частотой повторения импульсов (ВЧПИ) является однозначность при определении скорости целей.

Основными недостатками таких РЛС являются необходимость создания антенн с очень низким уровнем боковых лепестков, так как по ним принимается значительная мощность МО. Кроме того, возникают определённые трудности при решении задачи устранения неоднозначности измерения дальности до воздушной цели и значительно увеличивается количество отражающих площадок в пределах дальности действия бортовой радиолокационной станции (БРЛС). Ясно, что с понижением частоты повторения импульсов, обеспечивающим однозначное измерение дальности, сократится интервал, свободный от мешающих отражений, поскольку сблизятся линии спектра излучаемого сигнала (рис. 1).

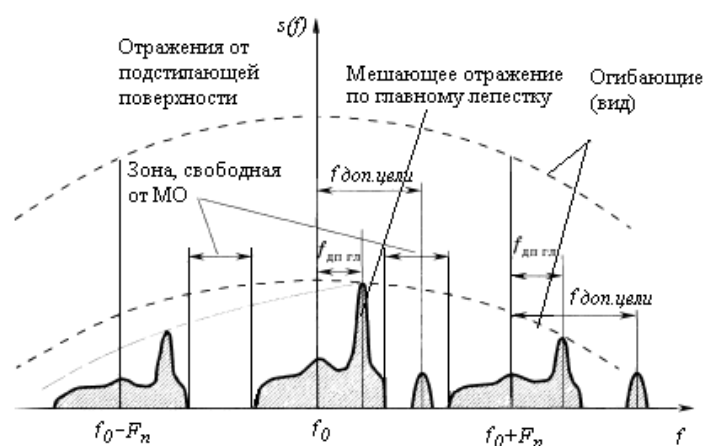


Рис. 1. Спектр сигналов на входе приёмника РЛС, перемещающейся параллельно подстилающей поверхности

Решение задачи видится в применении двухпозиционного режима работы РЛС, при котором разнесение в пространстве передающей и приёмной позиции существенно уменьшает количество и площадь элементов земной поверхности, одновременно «просматриваемых» лепестками диаграмм направленности как передающей, так и приёмной антенн (рис. 2).

Целью является выяснение особенностей формирования отражающих зон на поверхности Земли и получение алгоритма расчёта мощности мешающих отражений при двухпозиционном режиме работы бортовой радиолокационной станции. Алгоритм расчёта мощности мешающих отражений представляет интерес, так как позволяет построить характеристики обнаружения при заданном взаимном расположении носителей радиолокационной станции и цели.

Как известно, элементы разрешения на поверхности Земли представляют собой участки поверхности, ограниченные линиями равных доплеровских частот (изодопами) и линиями равных дальностей (изодалиями).

### Формирование участков мешающих отражений от поверхности Земли

На рис. 2 показано пространственное расположение носителей передатчика (ПРД), приёмника (ПРМ) и основные участки характерных отражений от поверхности Земли для случая двухпозиционной радиолокации. При высокой частоте повторения импульсов в пределах дальности действия двухпозиционной радиолокационной станции (ДПРЛС) имеется значительное количество участков (полосок дальности), сигналы от которых поступают на вход приёмника [1]. Ширина данных полосок определяется разрешающей способностью по дальности. За счёт доплеровской селекции на поверх-

ности Земли выделяются только те участки поверхности, частоты отражений от которых попадают в полосу пропускания доплеровского фильтра системы обнаружения. Эти участки ограничены линиями, которые по форме похожи на гиперболы, и имеют ширину на поверхности Земли, эквивалентную ширине полосы пропускания доплеровского фильтра. При выполнении стробирования по дальности и селекции по доплеровской частоте сигналы МО от поверхности Земли на вход РЛС приходят только от участков пересечения квазигиперболических полосок и эллипсов дальности (заштрихованные участки на рис. 2).

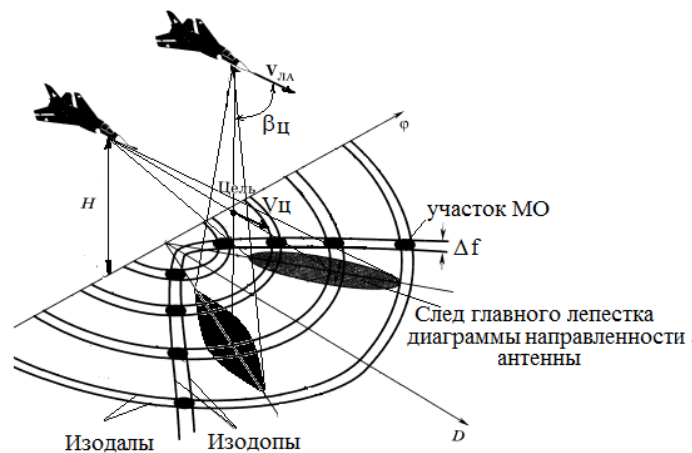


Рис. 2. Пространственное расположение носителей ПРД и ПРМ, характерные участки мешающих отражений от Земли для двухпозиционной РЛС при ВЧПИ

### Формирование линий равных доплеровских частот для двухпозиционной РЛС

Известно, что при работе бортового однопозиционного радиолокатора обзора земной поверхности в импульсном режиме линии равных доплеровских частот (изодопы) представляют собой гиперболические полоски, являющиеся результатом сечения конических поверхностей равных доплеровских частот плоскостью Земли. Все сигналы, отражённые элементарными площадками в пределах данной  $i$ -й полоски, будут иметь одинаковую частоту

$$f_{дон.i} = f_{дон.i-1} + \Delta f ,$$

где  $\Delta f$  – полоса пропускания доплеровских фильтров приёмника.

В качестве примера на рис. 3, а слева построено семейство изодоп, соответствующих частотам Доплера отражённого от поверхности Земли зондирующего сигнала. Возникновение частот Доплера в данном случае обусловлено движением носителя ПРД.

В качестве примера на рис. 3, а справа приведены графики изодоп, соответствующих частотам Доплера, которые возникают в результате движения ПРМ. При этом предполагается, что отражённый от просматриваемого участка поверхности Земли сигнал имеет одинаковую частоту для всех элементов этого участка.

Для двухпозиционной РЛС линию равных доплеровских частот можно построить из точек пересечения изодоп, соответствующих частотам Доплера, которые возникают в результате движения носителя ПРД, с изодопами, соответствующими частотам Доплера, которые образуются в результате движения носителя ПРМ. При этом необходимо использовать для построения точки пересечения такие изодопы, для которых сумма

соответствующих им доплеровских частот (частота Доплера системы) является постоянной величиной ( $f_{дон.сист.} = const$ ). В качестве примера на рис. 3, б построена образующая в результате пересечения соответствующих изодоп (рис. 3, а) линия равных доплеровских частот для ДПРС при высотах полёта носителей ПРД и ПРМ  $H_T = H_R = 1$  км, базе  $B = 1,5$  км и  $f_{дон} = 9$  кГц.

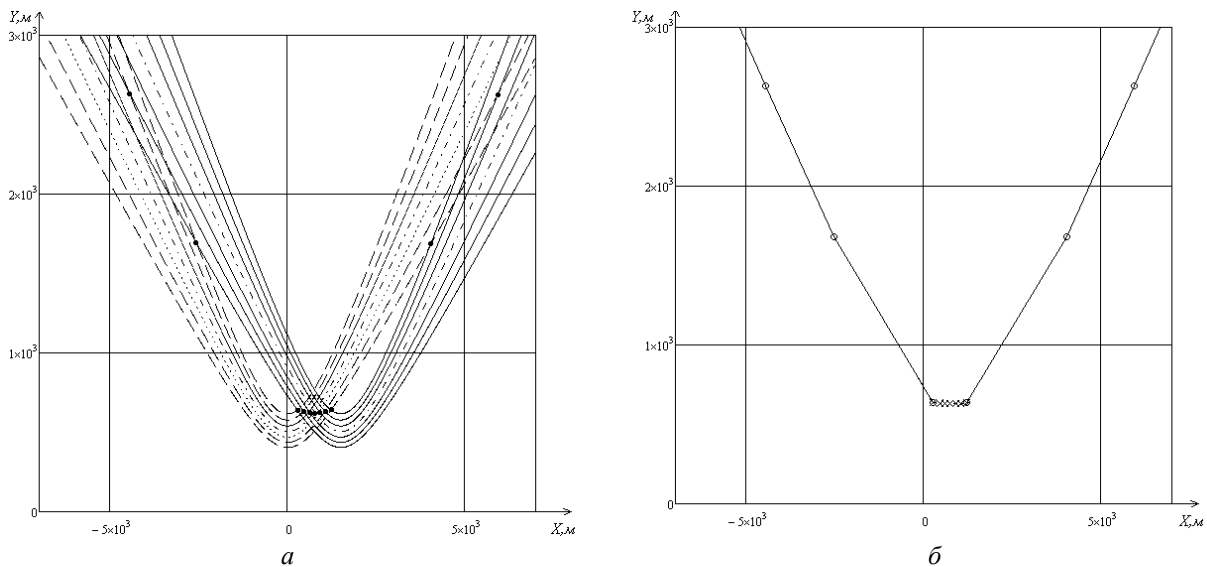


Рис. 3. Построение линий равных доплеровских частот для двухпозиционной РЛС:  
 а – изодопы для носителей ПРД (слева) и ПРМ (справа);  
 б – линии равных доплеровских частот для двухпозиционной РЛС

Запишем систему уравнений, состоящую из выраженных через переменную  $y$  формул для изодоп ПРМ и ПРД (гиперболы):

$$\begin{cases} y = \pm D_{Г2унТ} \sqrt{1 + (x + \Delta x)^2 / H_T^2}; \\ y = \pm D_{Г2унR} \sqrt{1 + x^2 / H_R^2}, \end{cases}$$

где  $\Delta x$  – проекция базы системы на поверхность Земли;  $D_{Г2унТ}$  – кратчайшая горизонтальная дальность (наименьшая проекция наклонной дальности на плоскость Земли) от летательного аппарата (ЛА), являющегося носителем ПРД, до соответствующей изодопы ПРД;  $D_{Г2унR}$  – кратчайшая горизонтальная дальность от ЛА, являющегося носителем ПРМ, до соответствующей изодопы ПРМ;  $H_T$  – высота полёта носителя ПРД;  $H_R$  – высота полёта носителя ПРМ.

Следует отметить, что для построения линии равных доплеровских частот двухпозиционной РЛС из точек пересечения линий равных доплеровских частот ПРД и ПРМ необходимо решить такое же количество систем уравнений, какое количество пар точек линии равных доплеровских частот двухпозиционной РЛС требуется получить. Таким образом параметры  $D_{Г2унТ}(f_{дон.Т})$  и  $D_{Г2унR}(f_{дон.Р})$  различны для точек пересечения  $x$ , так как зависят от частоты Доплера как для ПРМ, так и для ПРД:

$D_{Г2ун} = H \operatorname{ctg}(\arccos(\lambda f_{дон.} / V_{ЛА}))$ , где  $\lambda$  – длина волны, м;  $f_{дон.Р}$  – частота Доплера ПРМ, Гц;  $f_{дон.Т} = f_{дон.сист.} - f_{дон.Р}$  – частота Доплера ПРД, Гц;  $V_{ЛА}$  – скорость летательных аппаратов (носителей ПРМ и ПРД), м/с.

Решим систему, приравняв друг к другу её правые части:

$$D_{\Gamma_{2unT}} \sqrt{1 + (x + \Delta x)^2 / H_T^2} = D_{\Gamma_{2unR}} \sqrt{1 + x^2 / H_R^2}.$$

После подстановки  $D_{\Gamma_{2un}}$  и возведения в квадрат получаем:

$$\begin{aligned} & \left( H_T \operatorname{ctg} \left( \arccos \left( (f_{\text{дон.суст.}} - f_{\text{дон.Р}}) \lambda / v \right) \right) \right)^2 \left( 1 + (x^2 + 2x\Delta x + \Delta x^2) / H_T^2 \right) = \\ & = \left( H_R \operatorname{ctg} \left( \arccos \left( f_{\text{дон.Р}} \lambda / v \right) \right) \right)^2 \left( 1 + x^2 / H_R^2 \right). \end{aligned}$$

В качестве решения системы получили квадратное уравнение вида  $ax^2 + bx + c = 0$  с параметрами  $a, b, c$ :

$$\begin{aligned} a &= D_{\Gamma_{2unT}}^2 / H_T^2 - D_{\Gamma_{2unR}}^2 / H_R^2, \\ b &= 2\Delta x D_{\Gamma_{2unT}}^2 / H_T^2, \\ c &= D_{\Gamma_{2unT}}^2 \left( 1 + \Delta x^2 / H_T^2 \right) - D_{\Gamma_{2unR}}^2. \end{aligned}$$

Решением системы является пара точек пересечения:

$$x_{\text{пересеч.1,2}} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

При  $a = 0$  существует только одна точка пересечения:

$$x_{\text{пересеч.}} = \frac{-D_{\Gamma_{2unT}}^2 \left( 1 + \Delta x^2 / H_T^2 \right) + D_{\Gamma_{2unR}}^2}{2\Delta x D_{\Gamma_{2unT}}^2 / H_T^2} = \frac{-D_{\Gamma_{2unT}}^2 \left( H_T^2 + \Delta x^2 \right) + D_{\Gamma_{2unR}}^2 H_T^2}{2\Delta x D_{\Gamma_{2unT}}^2}.$$

Так как решение системы зависит от параметров  $D_{\Gamma_{2unT}}(f_{\text{дон.Т}})$  и  $D_{\Gamma_{2unR}}(f_{\text{дон.Р}})$ , то оно зависит от частоты  $f_{\text{дон.Р}}$ , которую невозможно в явном виде выразить из решения системы через  $x_{\text{пересеч.}}$  с целью подстановки в одно из уравнений системы. Поэтому уравнение для линии равных доплеровских частот двухпозиционной РЛС является трансцендентным относительно переменной  $x_{\text{пересеч.}}(f_{\text{дон.Р}})$  и может быть представлено в следующем виде:

$$y(f_{\text{дон.Р}}) = \left( H_R \operatorname{ctg} \left( \arccos \left( f_{\text{дон.Р}} \lambda / v \right) \right) \right)^2 \left( 1 + \left( x_{\text{пересеч.}}(f_{\text{дон.Р}}) \right)^2 / H_R^2 \right).$$

Решить это уравнение возможно только численным методом. Задаём шаг для индекса  $k$  изменения доплеровской частоты  $f_{\text{дон.Р}}$ , вычисляем для каждого номера  $k$  соответствующие  $x_{\text{пересеч.}}(k) = x_{\text{пересеч.}}(f_{\text{дон.Р}})$ , подставляем в уравнение для изодопы  $y(f_{\text{дон.Р}})$ . Строим графики изодоп для  $f_{\text{дон.Р}} = f_{\text{дон.мин}}$  и  $f_{\text{дон.Р}} + \Delta f = f_{\text{дон.макс}}$ , где  $\Delta f$  – полоса пропускания (ПП) доплеровского фильтра. Изложенный алгоритм позволяет получить графики для изодоп на поверхности Земли (рис. 3, б).

### Формирование линий равных дальностей для двухпозиционной РЛС

Для вычисления площади участка мешающих отражений от поверхности Земли получим математические выражения для линии равных дальностей и построим их.

Поскольку высоты полёта носителей и расстояние между ними малы по сравнению с размерами земного шара, то участок земной поверхности, на фоне которого проводится обнаружение воздушной цели, для простоты можно считать частью плоскости. Линии равных дальностей, лежащие на земной поверхности, являются сечениями круговых эллипсоидов (полуоси  $b$  и  $c$  равны, фокусы в точках расположения ПРМ и ПРД)

плоскостью Земли  $XU$  и представляют собой эллипсы. Начало координат системы для эллипсоида совместим с точкой, лежащей на середине отрезка между фокусами, ось  $X$  проходит через фокусы, ось  $Y$  параллельна плоскости Земли. Чтобы перейти к новой системе координат с началом в точке расположения приёмника; плоскостью  $\bar{X}\bar{Y}$ , параллельной рассматриваемому участку земной поверхности; осью  $\bar{Z}$ , сонаправленной с высотой, воспользуемся уравнениями преобразования координат [2]:

$$\begin{cases} x(\bar{x}, \bar{y}) = B/2 + \bar{x} \cos \theta + \bar{y} \sin \theta, \\ y(\bar{y}) = \bar{y}, \\ z(\bar{x}, \bar{z}) = -\bar{x} \sin \theta + \bar{z} \cos \theta, \end{cases}$$

где  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  – значения координат в новой системе отсчёта;  $B$  – база (расстояние между ПРД и ПРМ);  $H_R$  – высота полёта ПРМ;  $\theta$  – угол между базой и проекцией базы на землю, причём ПРМ находится выше ПРД.

Чтобы получить выражение для линий равных дальностей (эллипсов), необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{x^2(\bar{x}, \bar{y})}{a^2} + \frac{y^2(\bar{y})}{b^2} + \frac{z^2(\bar{x}, \bar{z})}{c^2} = 1, \\ \bar{z} = -H_R. \end{cases}$$

Подставим  $x$ ,  $y$  и  $z$  в систему:

$$\frac{[B/2 + \bar{x} \cos \theta + \bar{z} \sin \theta]^2}{a^2} + \frac{\bar{y}^2}{b^2} + \frac{[-\bar{x} \sin \theta + \bar{z} \cos \theta]^2}{c^2} = 1;$$

$$\frac{[B/2 + \bar{x} \cos \theta + \bar{z} \sin \theta]^2}{a^2} + \frac{\bar{y}^2}{b^2} = 1 - \frac{[-\bar{x} \sin \theta + \bar{z} \cos \theta]^2}{c^2};$$

$$\bar{y} = b \sqrt{1 - \frac{[-\bar{x} \sin \theta + \bar{z} \cos \theta]^2}{c^2} - \frac{[B/2 + \bar{x} \cos \theta + \bar{z} \sin \theta]^2}{a^2}}.$$

С учётом, что  $c = b$  и  $\bar{z} = -H_R$ , получим уравнение линий равной дальности для двухпозиционной РЛС на земной поверхности:

$$\bar{y}_{эл.} = b \sqrt{1 - \frac{[-\bar{x} \sin \theta - H_R \cos \theta]^2}{b^2} - \frac{[B/2 + \bar{x} \cos \theta - H_R \sin \theta]^2}{a^2}}.$$

Получим выражения большой  $a$  и малой  $b$  полуоси для семейства эллипсоидов (линий равных дальностей двухпозиционной РЛС):

$$a_2(s) = \frac{D_{сум.2}}{2};$$

$$D_{сум.2} = D_{сум.ц.} + scT_n + c\tau_u;$$

$$b_1(s) = \sqrt{a_1^2(s) - (B/2)^2}, \quad b_2(s) = \sqrt{a_2^2(s) - (B/2)^2}.$$

Здесь  $s$  – номер пары эллипсов, ограничивающих участок МО;  $D_{сум.1}(s)$  – меньшая суммарная дальность от ПРД и ПРМ до участка МО;  $D_{сум.2}(s)$  – большая суммарная дальность от ПРД и ПРМ до участка МО для эллипсов, ограничивающих участок МО,  $m$ ;  $\tau_u$  – длительность импульса,  $c$ ;  $T_n$  – период повторения импульсов,  $c$ ;  $c$  – скорость

света, м/с;  $B$  – база (расстояние между ПРМ и ПРД);  $D_{\text{сум.ц.}}$  – суммарное расстояние до цели от приёмника и передатчика.

На рис. 4 в качестве примера изображены рассчитанные по приведённому алгоритму линии равных дальностей при длительности импульса  $\tau_u = 1$  мс, периоде повторения импульсов  $T_n = 10$  мс, максимальной дальности 100 км и графики линий равных доплеровских частот для 19 доплеровских фильтров с  $\Delta f = 1$  кГц при высоте носителей 2 км и базе 1,5 км для двухпозиционной РЛС, длина волны  $\lambda = 0,03$  м, скорость полёта носителей 300 м/с. На рис. 4 также показаны направления главных лепестков (ГЛ) и двух ближайших боковых лепестков (БЛ) диаграмм направленности (ДН) ПРМ и ПРД, следы на земле ГЛ и БЛ1, ограниченные уровнем 0,7. Серым цветом выделены участки МО, сигнал от которых попадает в фильтр, соответствующий частоте Доплера 18 кГц, так как именно в этот фильтр будет поступать наиболее мощный сигнал по ГЛ ДН.

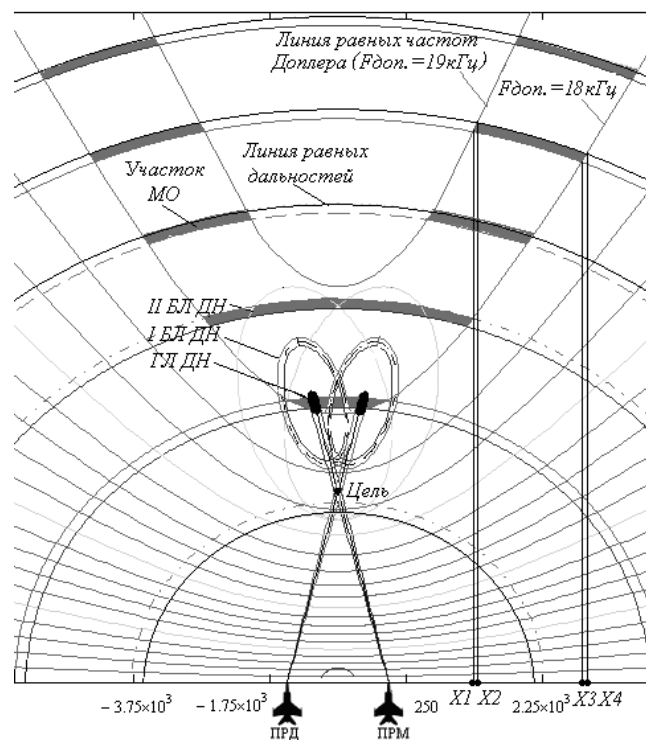


Рис. 4. Графики линий равных дальностей (эллипсы)

### Вычисление площади участков МО, сигналы от которых попадают одновременно в выбранные стробы дальности и доплеровской частоты

Предлагается следующий алгоритм вычисления площади участков МО.

1. Находим абсциссы точек пересечения изодоп и изодалий (аргументы функций) с помощью последовательного перебора и сравнения ординат изодоп и изодалий для различных значений абсцисс, соответствующих номерам отсчётов  $k$ , до тех пор, пока значения ординат не станут равными. Равенство ординат означает, что изодопы и изодалии пересекаются в данной точке.

Здесь  $x_1 = x(k_1)$  – точка пересечения второй изодопы, соответствующей  $f_{дон.маx}$  в ПП доплеровского фильтра (ДФ), и первой изодалии, соответствующей фронту зондирующего импульса;

$x_2 = x(k_2)$  – точка пересечения второй изодопы, соответствующей  $f_{дон.маx}$  в ПП ДФ, и второй изодалии, соответствующей спаду зондирующего импульса;

$x_3 = x(k_3)$  – точка пересечения первой изодопы, соответствующей  $f_{дон.миn}$  в ПП ДФ, и первой изодалии, соответствующей фронту зондирующего импульса;

$x_4 = x(k_4)$  – точка пересечения первой изодопы, соответствующей  $f_{дон.миn}$  в ПП ДФ, и второй изодалии, соответствующей спаду зондирующего импульса.

2. Вычисляем количество отсчётов  $u$  между соседними отсчётами  $k$ :

$$u_{\max} = \frac{\text{шаг } k}{\text{шаг } u} - \text{количество отсчётов } u.$$

3. Заменяем индекс  $k$  на соответствующий более высокой точности индекс  $m$ :

$$m(k, u) = k u_{\max} + u.$$

4. Вычисляем более точные значения точек

$$x_1 = x(m(k, u)), \quad x_2 = x(m(k_2, u_2)), \quad x_3 = x(m(k_3, u_3)), \quad x_4 = x(m(k_4, u_4)).$$

5. Находим площадь участка МО для левой (II, III четверть) и правой (I, IV четверть) стороны:

$$S_{MO} = S_1 + S_3 - S_2 - S_4.$$

Здесь

$$S_1 = \int_{x_1}^{x_2} D_{ГzumR} \sqrt{(1 + x^2/H_R^2)} dx - \text{площадь под квазигиперболой, соответствующей}$$

большей доплеровской частоте системы из пары квазигипербол, соответствующих границам ПП доплеровского фильтра;

$$S_2 = \int_{x_1}^{x_3} y_{эл1} dx - \text{площадь под первым эллипсом, соответствующим меньшей}$$

дальности из пары эллипсов, ограничивающих площадку МО;

$$S_3 = \int_{x_2}^{x_4} y_{эл2} dx - \text{площадь под вторым эллипсом, соответствующим большей дальности из пары эллипсов и отстоящим от первого эллипса на величину элемента разрешения};$$

меньшей доплеровской частоте из пары квазигипербол.

$$S_4 = \int_{x_3}^{x_4} D_{ГzumR} \sqrt{(1 + x^2/H_R^2)} dx - \text{площадь под квазигиперболой, соответствующей}$$

меньшей доплеровской частоте из пары квазигипербол.

### Расчёт мощности мешающих отражений

Вычисляем координаты центров участков мешающих отражений, расположенных слева  $(x_{cp.L}(s, n), y_{cp.L}(s, n))$  от линии пути ПРМ, то есть во II и III четвертях, и справа  $(x_{cp.R}(s, n), y_{cp.R}(s, n))$  от линии пути ПРМ, то есть в I и IV четвертях, как среднее арифметическое минимальных и максимальных значений абсцисс и ординат точек, принадлежащих этому участку. Здесь  $s$  – номер по дальности и  $n$  – по частоте Доплера.



Выражения для координат центров участков МО могут быть представлены в следующем виде:

$$x_{cp.L}(s, n) = x_{cp.II(III)}(s, n) = \frac{x_L(m(k1, u1)) + x_L(m(k4, u4))}{2};$$

$$x_{cp.R}(s, n) = x_{cp.I(IV)}(s, n) = \frac{x_R(m(k1, u1)) + x_R(m(k4, u4))}{2};$$

$$y_{cp.L}(s, n) = \frac{y_L(m(k2, u2)) + y_L(m(k3, u3))}{2};$$

$$y_{cp.R}(s, n) = \frac{y(m_R(k2, u2)) + y(m(k3, u3))}{2}.$$

Определяем горизонтальную дальность до центра левой площадки от ПРД  $\rho_{ПРД.L}(s, n)$  и от ПРМ  $\rho_{ПРМ.L}(s, n)$  и горизонтальную дальность правой площадки от ПРД  $\rho_{ПРД.R}(s, n)$  и от ПРМ  $\rho_{ПРМ.R}(s, n)$ :

$$\rho_{ПРД.L}(s, n) = \sqrt{(-x_{cp.L}(s, n) - B)^2 + y_{cp.L}^2(s, n)};$$

$$\rho_{ПРМ.L}(s, n) = \sqrt{x_{cpL}^2(s, n) + y_{cpL}^2(s, n)};$$

$$\rho_{ПРД.R}(s, n) = \sqrt{(x_{cpR}(s, n) + B)^2 + y_{cpR}^2(s, n)};$$

$$\rho_{ПРМ.R}(s, n) = \sqrt{x_{cpR}^2(s, n) + y_{cpR}^2(s, n)},$$

где  $B$  – база.

Угол места к центру левой  $\varphi_L$  и угол места к центру правой площадки МО  $\varphi_R$  от ПРД и ПРМ вычисляем согласно выражениям:

$$\varphi_L = \arctg(H / \rho_L(s, n));$$

$$\varphi_R = \arctg(H / \rho_R(s, n)).$$

Находим угол по азимуту к центру площадки (положительные углы откладываются влево по отношению к направлению полёта ЛА, а отрицательные – вправо) для ПРД и ПРМ:

$$\varphi_{аз.ПРД.I} = \arctg\left(\frac{x_{cpI}(s, n) + B}{y_{cpI}(s, n)}\right); \quad \varphi_{аз.ПРД.II} = \arctg\left(\frac{x_{cpII}(s, n) + B}{y_{cpII}(s, n)}\right);$$

$$\varphi_{аз.ПРД.III} = -\pi + \arctg\left(\frac{x_{cpIII}(s, n) + B}{y_{cpIII}(s, n)}\right); \quad \varphi_{аз.ПРД.IV} = \pi + \arctg\left(\frac{x_{cpIV}(s, n) + B}{y_{cpIV}(s, n)}\right);$$

$$\varphi_{аз.ПРМ.I} = \arctg\left(\frac{x_{cpI}(s, n)}{y_{cpI}(s, n)}\right); \quad \varphi_{аз.ПРМ.II} = \arctg\left(\frac{x_{cpII}(s, n)}{y_{cpII}(s, n)}\right);$$

$$\varphi_{аз.ПРМ.III} = -\pi + \arctg\left(\frac{x_{cpIII}(s, n)}{y_{cpIII}(s, n)}\right); \quad \varphi_{аз.ПРМ.IV} = \pi + \arctg\left(\frac{x_{cpIV}(s, n)}{y_{cpIV}(s, n)}\right).$$

Задаём угловое положение главного лепестка ДН для ПРД и ПРМ по азимуту  $\alpha_{аз.ПРД,ПРМ}$  и углу места  $\beta_{у.м.ПРД,ПРМ}$  в зависимости от положения цели, при этом отрицательные углы откладываются влево от направления полёта ЛА, а положительные – вправо.

Вычисляем пространственные углы между направлением на центр площадки (для I, II, III, IV четвертей) и направлением главного лепестка ДН ПРД и ПРМ [3]:

$$\theta_{I(II, III, IV)ПРД(ПРМ)} = \arccos \left[ \frac{\cos(\varphi_{у.м.I(II, III, IV)}) \cos(\alpha_{аз.} - \varphi_{аз.I(II, III, IV)}) \cos(\beta_{у.м.} - \varphi_{у.м.проект.I(II, III, IV)})}{\cos(\varphi_{у.м.проект.I(II, III, IV)})} \right].$$

Вычисляем мощность мешающих отражений в первой и второй четвертях (с положительной доплеровской частотой):

$$PI(II) = \frac{P_{ПРД} G_a S_a FI(II)_{ПРД} (\theta I(II)) FI(II)_{ПРМ} (\theta I(II)) S_{плR}}{(4\pi)^2 R_{ПРД}^2 R_{ПРМ}^2} \sin(\varphi_{у.м.I(II)}),$$

где  $FI$ ,  $FII$  – коэффициент направленного действия (КНД) антенны ПРМ (ПРД) в направлении на участки МО в первой и второй четвертях;  $G_a$  – коэффициент усиления антенны;  $S_a$  – эффективная площадь антенны;  $P_{ПРД}$  – мощность передатчика;  $S_{пл}$  – площадь правого участка МО;  $R_T, R_R$  – расстояние от ПРД и ПРМ до цели соответственно;  $\varphi_{у.м.R}, \varphi_{у.м.L}$  – угол места направления на правый и левый участки МО соответственно.

Для проведения расчёта необходимо воспользоваться выражением для КНД конкретного типа антенн, например, круговой:

$$F(\theta) = \left| \frac{J_1(a \cdot \sin(\theta))(1 + \cos(\theta))}{a \cdot \sin(\theta)} \right|,$$

где  $J_1(a \sin(\theta))$  – функция Бесселя первого порядка;  $a$  – радиус антенны, м.

Мощность МО в верхней полуплоскости участка поверхности Земли определяется как сумма мощностей для первой и второй четверти (с положительной доплеровской частотой):

$$P_{МО+} = PI + PII.$$

Вычисляем мощность мешающих отражений для четвертей нижней полуплоскости (с отрицательной доплеровской частотой) [3]:

$$PIII(IV) = \frac{P_{ПРД} G_a S_a FIII(IV)_{ПРД} (\theta III(IV)) FIII(IV)_{ПРМ} (\theta III(IV)) S_{плR}}{(4\pi)^2 R_{ПРД}^2 R_{ПРМ}^2} \sin(\varphi_{у.м.III(IV)}).$$

Находим мощность мешающих отражений в нижней полуплоскости путём сложения мощностей МО для третьей и четвёртой четверти:

$$P_{МО-} = PIII + PIV.$$

В качестве примера по разработанному алгоритму была рассчитана мощность мешающих отражений от участков земной поверхности в полосе пропускания доплеровских фильтров при одном произвольном положении цели для однопозиционного режима и двухпозиционного режима работы РЛС (рис. 5) при равных энергетических параметрах: дальность до цели, мощность передатчика, диаграммы направленности антенн.



Рис. 5. Зависимость мощности мешающих отражений в полосе пропускания доплеровских фильтров  $\Delta f = 1$  кГц (спектральной плотности мощности) от частоты Доплера

На графиках прослеживается форма диаграммы направленности антенн ПРД и ПРМ (максимумы и минимумы), наибольший максимум попадает на ГЛ ДН. Наблюдается достаточно высокий уровень мощности на частотах, близких к нулю, что соответствует отражениям от участка земной поверхности, близкой к области, расположенной непосредственно под одним из летательных аппаратов.

Результаты расчётов показывают улучшение отношения сигнала к шуму на выходе ДПРЛС, что позволяет улучшить характеристики обнаружения для случая низколетящих целей без увеличения излучаемой мощности передатчика РЛС.

### Заключение

Рассмотрены особенности формирования отражающих зон на поверхности Земли при двухпозиционном режиме работы бортовой радиолокационной станции, выяснены возможные конфигурации зон и разработан алгоритм расчёта мощности мешающих отражений. Алгоритм позволяет улучшить характеристики обнаружения низколетящих целей без увеличения излучаемой мощности передатчика радиолокационной станции. Анализ результатов расчёта мощности шумов на входе приёмника при различных вариантах взаимного расположения передатчика, приёмника и цели позволит для решения каждой конкретной задачи обнаружения оптимизировать траектории взаимного перемещения носителей передатчика и приёмника двухпозиционной радиолокационной станции.

### Библиографический список

1. Дудник П.И., Ильчук А.Р., Татарский Б.Г. Многофункциональные радиолокационные системы. М.: Дрофа, 2007. 283 с.
2. Корн Г.А., Корн Т.М. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы. М.: Наука, 1978. 832 с.
3. Григорин-Рябов В.В., Васин В.В., Власов О.В., Дудник П.И., Степнов Б.М. Радиолокационные устройства (теория и принципы построения). М.: Советское радио, 1970. 680 с.

## **ANALYSIS OF THE FEATURES OF EARTH SURFACE CLUTTER FORMATION IN THE CASE OF LOW-FLYING TARGET DETECTION WITH THE USE OF A BISTATIC RADAR**

© 2016

**S. A. Vorontsova** postgraduate student, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, [cbeta116@mail.ru](mailto:cbeta116@mail.ru)

It has been found that the usage of the bistatic mode makes it possible to reduce the power of clutter due to the decrease of the number and area of elements on the Earth surface that reflect the sounding signal. The power of these reflections to a large extent determines the signal / noise ratio at the input of the air-borne radar receiver and, as a result, the probability of correct detection of targets and accuracy of determining their coordinates. Based on the analysis of the features of the formation of reflecting patches on the Earth surface all possible configurations of these areas and analytical expressions for the calculation of their areas have been obtained. As a result of the study, analytical expressions and graphs of lines of equal distances (izodops) and lines of equal Doppler frequencies (izodals) forming these zones specific for a bistatic radar have been obtained. This has made it possible to develop a universal algorithm for calculating the power of clutter when detecting low-flying targets, which is useful for comparative analysis of the clutter power and detection characteristics for various configurations of the relative position of the receiver, transmitter and targets, as well as for comparing the detection characteristics of a monostatic and a bistatic radars. In accordance with this algorithm calculations have been performed and the graphs of dependency of the clutter power in the Doppler filter bandwidth on the frequency of their adjustment have been obtained as a result of the calculation for monostatic and bistatic radars.

*Form of the ground clutter reflector, area of the ground clutter reflector, power of the clutter reflections, Earth surface, bistatic radar, low-flying air targets, lines of equal range, lines of equal Doppler frequencies, pulse-recurrence frequency.*

---

*Citation:* Vorontsova S.A. Analysis of the features of Earth surface clutter formation in the case of low-flying target detection with the use of a bistatic radar. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 3. P. 131-142. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-3-131-142

### **References**

1. Dudnik P.I., Ilchuk A.R., Tatarskiy B.G. *Mnogofunktsional'nye radiolokatsionnye sistemy* [Multifunctional radar systems]. Moscow: Drofa Publ., 2007. 283 p.
2. Korn G.A., Korn T.M. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Definitions, Theorems, Formulas*. McGraw-Hill, 1968. 1130 p.
3. Grigorin-Riabov V.V., Vasin V.V., Vlasov O.V., Dudnik P.I., Stepnov B.M. *Radio-lokatsionnye ustroystva (teoriya i printsipy postroeniya)* [Radar devices (theory and design concepts)]. Moscow: Sovetskoe Radio Publ., 1970. 680 p.