

УДК 621.396.96

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОБЪЕКТА НА ЕГО РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ, ФОРМИРУЕМОЕ В РАДИОЛОКАТОРЕ БОКОВОГО ОБЗОРА С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

*Брызгалов А.П., начальник лаборатории, к.т.н., доцент ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», e-mail: a\_bryzgalov@gosniias.ru.*

### EFFECT OF THE OBJECT VELOCITY ON THE RADAR IMAGE FORMED BY A SYNTHETIC-ARRAY SIDE-LOOKING RADAR

*Bryzgalov A.P.*

*We estimate the offset and distortion of radar images formed by a side-looking synthetic-aperture radar while locating moving objects. We study the effect of radial and tangential velocity of objects. The results are proved on the model of radar images formation coordinated with the area location (fixed objects).*

**Key words:** radar, synthetic aperture, side looking, radar image, shift, velocity effect, tangential velocity, radial component.

**Ключевые слова:** радиолокатор, синтезированная апертура, боковой обзор, радиолокационное изображение, смещение, влияние скорости, тангенциальная составляющая, радиальная составляющая.

#### Введение

В радиолокаторах бокового обзора с синтезированной апертурой (РСА), осуществляющих дистанционное зондирование земной поверхности и формирование ее радиолокационных изображений (РЛИ), при лоцировании движущихся объектов происходит смещение изображений этих объектов на местности, а также их искажение. Это создает определенные трудности как при решении задач обнаружения и распознавания движущихся объектов, оценки их положения и скорости, так и при летных испытаниях и математическом моделировании систем с синтезированной антенной решеткой (САР). Частично смещение РЛИ движущихся объектов уже рассматривалось, в частности в [1], но многие вопросы требуют дальнейших исследований.

#### Влияние радиальной составляющей скорости лоцируемого объекта на его РЛИ

Влияние радиальной составляющей скорости объекта, т.е. скорости  $V_{об\_x}$ , направленной вдоль оси  $X$ , при том, что траектория носителя РСА совпадает с осью  $Y$ , может быть оценено, исходя из рис. 1. Для упрощения анализа полагаем, что движение объекта происходит только вдоль оси  $X$ . На рис. 1 показано взаимное расположение объекта и носителя при  $i$ -м зондировании: объект находится в точке  $A$ , совпадающей с  $m$ -м элементом поверхности с координатами  $x_{mi}$ ,  $y_{mi}$ , а носитель РСА находится в точке с координатами  $0$ ,  $y_i$ .

В РСА при формировании РЛИ  $m$ -го элемента поверхности при каждом зондировании (на интервале синтеза его РЛИ) осуществляется согласованная внутриимпульсная (частотно-временная), а затем и

*Оцениваются смещение и искажения радиолокационных изображений, формируемых в радиолокаторе бокового обзора местности с синтезированной апертурой при лоцировании движущихся объектов. Рассматривается влияние радиальных и тангенциальных составляющих скорости объектов. Результаты подтверждаются на модели формирования радиолокационных изображений, согласованной с лоцированием местности (неподвижных объектов).*

межпериодная (за интервал синтеза) обработка входного сигнала. При этом из параметров, характеризующих взаимное расположение и движение носителя РСА и лоцируемого объекта, при обработке используются 2 параметра (см., например, [2]): задержка эхосигнала, определяемая дальностью  $R_{лоц\_mi}$  до  $m$ -го элемента – расстоянием между фазовым центром антенны РСА и этим элементом, и радиальная составляющая скорости их взаимного перемещения  $V_{лоц\_r\_mi}$ . Необходимо совпадение этих параметров входного сигнала и обработки, чтобы получить максимальный сигнал РЛИ, соответствующий согласованной обработке для  $m$ -го элемента поверхности.

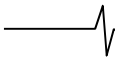
Для локатора бокового обзора при лоцировании неподвижных объектов скорость  $V_{лоц\_r\_mi}$  на этапе синтеза, исходя из рис. 1, меняется в соответствии с выражением

$$V_{лоц\_r\_mi} = V_{нос\_r\_mi} = V_{нос} \sin \alpha_{mi}, \quad (1)$$

где  $V_{нос}$  – скорость носителя РСА на интервале синтеза,  $V_{нос\_r\_mi}$  – радиальная составляющая этой скорости, соответствующая проекции скорости носителя на линию визирования  $m$ -го элемента носителем,  $\alpha_{mi}$  – угол визирования  $m$ -го элемента на  $i$ -ом зондировании относительно нормали к траектории носителя, который определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha_{mi} = \Delta y_{mi} / R_{mi}, \quad (2)$$

где  $R_{mi}$  – расстояние от  $m$ -го элемента до траектории полета носителя; при совпадении положения объекта с положением  $m$ -го элемента  $R_{mi}$  равно расстоянию  $R_{об\dot{i}}$  от объекта до траектории (см. рис. 1),



$$\Delta y_{mi} = y_{mi} - y_i.$$

При этом согласованная обработка для каждого  $m$ -го элемента рассчитана на  $N$  зондирований за интервал синтезирования  $D_{сум}$  при изменении  $\Delta y_{mi}$  в пределах  $\pm D_{сум}/2$ .

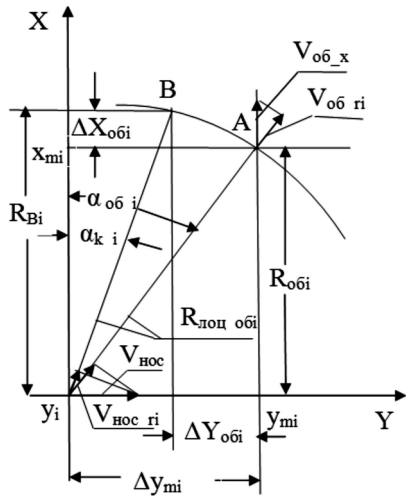


Рис. 1. Взаимное расположение носителя, объекта и его РЛИ при  $i$ -м зондировании ( $V_{об\_x} > 0$ )

При нахождении носителя на траверзе  $m$ -го элемента ( $\Delta y_{mi} = 0$ ), что для лоатора бокового обзора при лоцировании неподвижного объекта соответствует середине интервала синтезирования,  $\alpha_{mi} = 0$ , и поэтому входной сигнал и согласованный с ним опорный сигнал имеют параметры:  $V_{лоц\_r\_mi} = 0$  и  $R_{лоц\_mi} = R_{mi}$ .

При лоцировании движущегося объекта параметры меняются. В общем случае, в соответствии с рис. 1,  $V_{лоц\_r\_mi} = V_{нос} \sin \alpha_{mi} - V_{об\_x} \cos \alpha_{mi}$ , (3) и, в частности, на траверзе  $m$ -го элемента, когда  $\alpha_{mi} = 0$ ,  $V_{лоц\_r\_mi} = V_{об\_x}$ . То есть, в этом случае применение для  $m$ -го элемента обработки, согласованной с неподвижным объектом, приводит к несогласованной обработке сигнала.

Однако на каждом зондировании, в целях формирования РЛИ участка местности, проводят обработку входного сигнала, согласованную с другими точками, и при этом угол визирования  $\alpha_{mi}$  для этих точек меняется. При этом может оказаться, что для некоторого направления при угле визирования  $\alpha_{ki}$  скорость  $V_{лоц\_r\_ki}$ , получаемая из (1) при лоцировании неподвижного объекта, будет равна радиальной составляющей (3) для движущегося объекта при угле визирования  $\alpha_{mi}$ , т.е. выполняется равенство:

$$V_{нос} \sin \alpha_{ki} = V_{нос} \sin \alpha_{mi} - V_{об\_x} \cos \alpha_{mi} \quad (4)$$

Это означает, что сигнал, отраженный от движущегося объекта, совпадающего с  $m$ -м элементом РЛИ, пройдет согласованную обработку для  $k$ -го элемента, для которого угол визирования равен  $\alpha_{ki}$ , а второй параметр обработки  $R_{лоц\_ki} = R_{лоц\_mi}$ . При этом сигнал, прошедший согласованную обработку, окажется не в точке  $A$  – в точке нахождения объекта, а переместится в точку  $B$  (см. рис. 1) – в точку пересечения окружности (с радиусом  $R_{лоц\_mi}$  и центром в точке расположения носителя РСА  $y_i$ ) с линией визирования под углом  $\alpha_{ki}$ .

Исходя непосредственно из рис. 1, выражение (4) можно записать в виде:

$$V_{нос} \frac{\Delta y_{ki}}{R_{лоц\_mi}} = V_{нос} \frac{\Delta y_{mi}}{R_{лоц\_mi}} - V_{об\_x} \frac{R_{mi}}{R_{лоц\_mi}}, \quad (5)$$

а так как  $\Delta y_{ki} = \Delta y_{mi} - \Delta Y_{об_i}$ , то из этого следует, что смещение по оси  $Y$  изображения объекта, движущегося вдоль оси  $X$ ,

$$\Delta Y_{об_i} = R_{об\_i} \frac{V_{об\_x}}{V_{нос}}, \quad (6)$$

что при  $R_{об\_i} \gg D_{сум} V_{об\_x} / V_{нос}$  можно записать как

$$\Delta Y_{об} \approx R_{об} \frac{V_{об\_x}}{V_{нос}} \quad (7)$$

и что соответствует [1].

Из рис. 1 следует так же, что при  $i$ -ом зондировании смещение на РЛИ положения движущегося объекта по оси  $X$

$$\Delta X_{mi} = R_{mi} - R_{Вi}. \quad (8)$$

Учитывая в (8), что  $R_{Вi} = R_{лоц\_mi} \cos \alpha_{ki}$ , а  $R_{лоц\_mi} = R_{mi} / \cos \alpha_{mi}$ , можно записать

$$\Delta X_{mi} = R_{mi} \left( 1 - \frac{1}{\cos \alpha_{mi}} \cos \alpha_{ki} \right). \quad (9)$$

Вместе с тем, из (4) при малых значениях  $\alpha_{ki}$  и  $\alpha_{mi}$  следует равенство:

$$\alpha_{ki} \approx \frac{V_{нос} \alpha_{mi} - V_{об\_x}}{V_{нос}}. \quad (10)$$

В этом случае можно показать, что

$$\Delta X_{mi} \approx -\frac{R_{mi}}{2} \left( 2\alpha_{mi} \frac{V_{об\_x}}{V_{нос}} - \frac{V_{об\_x}^2}{V_{нос}^2} \right). \quad (11)$$

На интервале синтезирования  $\alpha_{mi}$  меняется от  $D_{сум}/2R_{mi-нач}$  в начале интервала до 0 в центре интервала и до  $-D_{сум}/2R_{mi-кон}$  на последнем зондировании, и в соответствии с (11) меняется смещение  $\Delta X_{mi}$ . Но за счет движения самого объекта происходит также реальное смещение этого объекта относительно его положения на начало интервала синтезирования на величину

$$\Delta X_{об_i} \approx \left[ \frac{D_{сум}}{2} - \Delta y_{mi} \right] \frac{V_{об\_x}}{V_{нос}}. \quad (12)$$

В соответствии с изменением  $\Delta y_{mi}$  значение  $\Delta X_{об_i}$  за интервал синтезирования меняется от 0 до

$$\Delta X_{об_i} \approx D_{сум} \frac{V_{об\_x}}{V_{нос}}.$$

В результате при каждом зондировании суммарное смещение изображения за счет первого слагаемого в (11) и смещения (12) сводит все сигналы, получаемые от объекта за интервал синтезирования, в одну точку по дальности, соответствующую положению центральной точки интервала синтезирования. Соответственно, не происходит и расширение ГЛ РТИ по дальности (по оси  $X$ ). Но максимум РЛИ объекта смещен относительно указанной точки по оси  $X$  на величину  $\Delta X_{m\_pez}$ , определяемую вторым слагаемым в (11).

Значения величин  $\Delta Y_{mi}$  и  $\Delta X_{m\_pez}$  для РЛИ можно проиллюстрировать численными примерами. Так, при  $R_{об\_m} = 10000$  м,  $V_{нос} = 100$  м/с,  $V_{об\_x} = -0,1$  м/с в соответствии с (7) и вторым слагаемым в (11)  $\Delta Y_{mi} = -10$  м, а  $\Delta X_{m\_pez} = 0,005$  м. При возрастании скорости объекта до 1 м/с –  $\Delta Y_{mi} = -100$  м и  $\Delta X_{m\_pez} = 0,5$  м.

Полученные результаты были проверены путем математического моделирования РСА. Использовалась корреляционно-фильтровая согласованная обработка, подробно изложенная в [2] и [3]. На рис. 2-5 приведены результаты моделирования РСА при согласованной обработке когерентной последовательности импульсов на несущей частоте 1 ГГц с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в импульсе с девиацией 200 МГц. Длительность каждого импульса составляла 0,2 мс, период повторения – 10 мс. Использовалась обработка пачки импульсов за 10 с, что при скорости носителя  $V_{нос} = 100$  м/с обеспечивало интервал синтезирования  $D_{синт} = 1000$  м.

На рис. 2 приведено яркостное РЛИ (в координатах  $X, Y$ ) при наличии единственного отражателя с координатами на момент прохождения центра интервала синтезирования  $x = 10000$  м,  $y = 0$  (т.е.  $R_{об} = 10$  км) при  $V_{нос} = 100$  м/с и  $V_{об,x} = -0,1$  м/с. На рис. 3 приведено то же РЛИ в формате 3D. Из рис. 2 следует, что смещение максимума отклика на одиночный точечный движущийся объект по оси  $Y$  составляет -10 м, а по оси  $X$  – незначительно, что соответствует ранее полученным численным результатам.

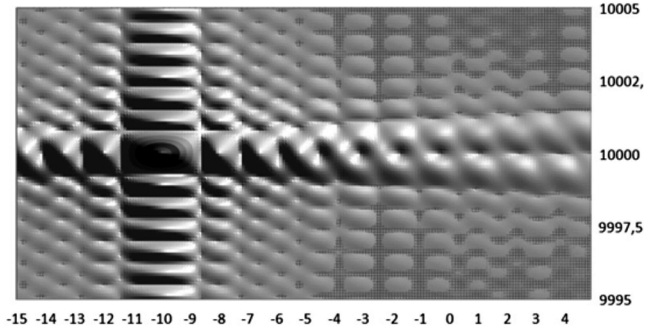


Рис. 2. РЛИ отражателя (в координатах  $X, Y$ ) при  $x = 10000$  м,  $y = 0$  и  $V_{об,x} = -0,1$  м/с

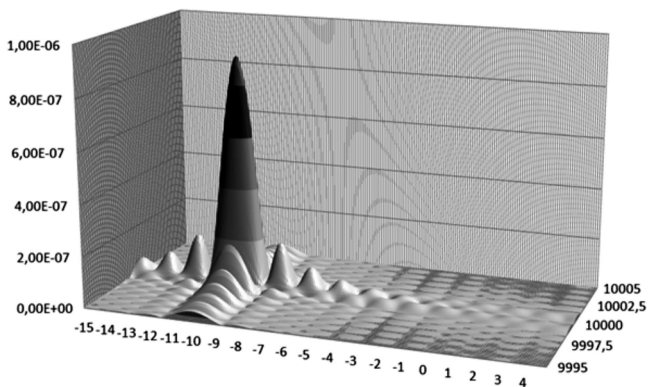


Рис. 3. РЛИ (в формате 3D) отражателя при  $x = 10000$  м,  $y = 0$  и  $V_{об,x} = -0,1$  м/с

На рис. 4 приведено двумерное (яркостное) РЛИ при тех же исходных данных, что и для рис. 2, но при  $V_{об,x} = -1$  м/с. Из рис. 4 и численных данных, полученных при его вычислении, следует, что  $\Delta Y_m = -100$  м и  $\Delta X_{m,рез} = 0,6$  м, что также соответствует ранее полученным аналитическим данным.

Представляет интерес анализ влияния радиального движения объекта на его РЛИ в азимутальном направлении. Косвенно изменения формы главного лепестка РЛИ объекта можно оценить по изменению параметров

обработки сигнала на интервале синтезирования.

Для неподвижного объекта радиальная составляющая скорости взаимного перемещения носителя и объекта определяется в соответствии с выражением (1):

$$V_{лоц,r,mi} = V_{нос} \sin \alpha_{mi},$$

где угол  $\alpha_{mi}$  на интервале синтезирования меняется, учитывая его малость, в пределах  $\pm D_{синт}/2R_{об}$ . На эти скорости настроена согласованная обработка для неподвижных объектов. Для центральной точки интервала синтезирования, как уже отмечалось, и скорость  $V_{лоц,r,mi} = 0$ , и угол визирования  $\alpha_{mi} = 0$ .

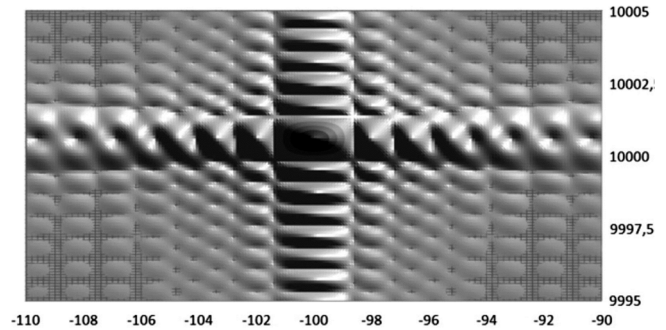


Рис. 4. РЛИ (в координатах  $X, Y$ ) отражателя при  $x = 10000$  м,  $y = 0$  и  $V_{об,x} = -1$  м/с

При лоцировании движущегося объекта равенство нулю  $V_{лоц,r,mi}$  реализуется при некотором смещенном угле визирования  $\alpha_{см}$ . В соответствии с (3) с учетом, что  $\alpha_{см} \ll 1$ ,  $\alpha_{см} \approx V_{об}/V_{нос}$ , (13) и это есть угол визирования объекта из центра интервала синтезирования.

Для одной из крайних точек интервала синтезирования при смещении угла визирования на некоторый угол  $\Delta\alpha$  должно выполняться:

$$V_{нос} \sin(\alpha_{см} + \Delta\alpha) - V_{об,x} \cos(\alpha_{см} + \Delta\alpha) = V_{нос} \sin(D_{синт}/2 R_{об}), \quad (14)$$

или приближенно

$$V_{нос} (\alpha_{см} + \Delta\alpha) - V_{об,x} \approx V_{нос} D_{синт}/2 R_{об}. \quad (15)$$

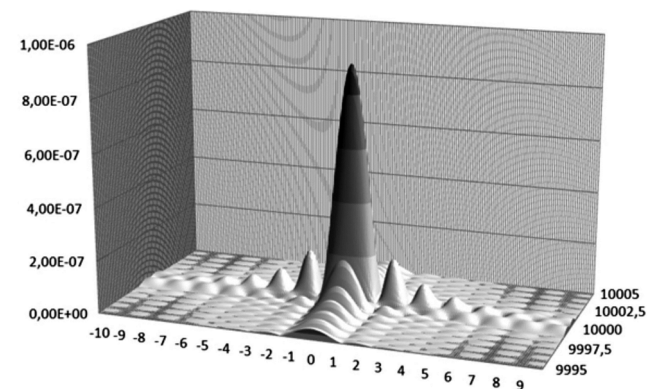


Рис. 5. РЛИ неподвижного объекта с координатами  $x = 10000$  м,  $y = 0$

С учетом (13) получаем, что  $\Delta\alpha \approx D_{синт}/2R_{об}$ . Аналогично для другой крайней точки. А это означает, что интервал синтезирования при переходе к лоцированию движущегося вдоль оси  $X$  объекта несколько сместился, но величина его не изменилась. Следовательно, ГЛ РЛИ в азимутальном сечении (вдоль оси  $Y$ ) для движущегося вдоль оси  $X$  объекта также практически не изменился.

Это подтверждают результаты моделирования. На рис. 5 приведено РЛИ для неподвижного объекта при тех же исходных данных, что и для рис. 2, полученного для движущегося объекта. По форме ГЛ на обоих рисунках хорошо совпадают.

### Влияние тангенциальной составляющей скорости лоцируемого объекта на его РЛИ

Для оценки влияния на РЛИ объекта тангенциальной составляющей его скорости  $V_{об\_y}$  (см. рис.6) следует рассмотреть это влияние в трех точках интервала синтезирования этого РЛИ: в центральной и в двух крайних. Очевидно, что в центральной точке носитель находится на траверзе объекта, и в этой точке радиальные составляющие скоростей объекта и носителя равны нулю и не зависят от тангенциальной составляющей скорости объекта. При зондировании объекта в этой точке производится согласованная обработка входного сигнала, не зависящая от значения  $V_{об\_y}$ .

Влияние  $V_{об\_y}$  при зондировании в двух крайних точках интервала синтезирования можно оценить, исходя из рис. 6 и 7.

На рис. 6 приведено расположение лоцируемого объекта (точка  $A$ ,  $V_{об\_y} < 0$ ) и носителя (точка 1,  $V_{нос} > 0$ ) при некотором  $i$ -ом зондировании, соответствующем первому зондированию объекта на интервале синтезирования его РЛИ, при котором суммарная радиальная скорость сближения носителя и объекта в точке  $A$ , определяемая как

$$V_{лоц\_r\_дв\_обі} = V_{нос} \sin \alpha_{об\_i} - V_{об\_y} \sin \alpha_{об\_i} \quad (16)$$

сравнилась с максимальной расчетной скоростью сближения

$$V_{лоц\_r\_макс} = V_{нос} \sin \alpha_{синт} \quad (17)$$

из диапазона скоростей, используемых при согласованной обработке для неподвижного объекта в некоторой точке  $B$ , для которой  $\alpha_{k\_i} = \alpha_{синт}$  при том, что весь диапазон изменения  $\alpha_{k\_i}$  определяется двумя крайними значениями

$$\pm \alpha_{синт} \approx \pm \arctg \frac{D_{синт}}{2R_B}.$$

В рассматриваемом случае при отрицательной скорости объекта  $\alpha_{синт} \geq \alpha_{k\_i} \geq \alpha_{об\_i}$ . При этом при первом и последующих зондированиях существует точка, в которой выполняется равенство

$$V_{нос} \sin \alpha_{k\_i} = V_{нос} \sin \alpha_{об\_i} - V_{об\_y} \sin \alpha_{об\_i} \quad (18)$$

или

$$\sin \alpha_{об\_i} = \frac{V_{нос}}{V_{нос} - V_{об\_y}} \sin \alpha_{k\_i}. \quad (19)$$

Таким образом, при движении носителя отклик согласованной обработки при первом зондировании объекта появится в точке  $B$ , в которой выполнится равенство (19) при  $\alpha_{k\_i} = \alpha_{синт}$ . В этом случае первый параметр обработки – расчетная радиальная скорость в точке  $B$  – соответствует реальной радиальной скорости при нахождении объекту в точке  $A$ . Вторым параметром – расстоянием  $R_{лоц\_обі}$  – определяется выражением

$$R_{лоц\_обі} = D_{синт} / 2 \sin \alpha_{k\_i}. \quad (20)$$

Это означает, что на этом такте зондирования сигнал, отраженный от движущегося объекта в точке  $A$ ,

пройдет согласованную обработку при формировании РЛИ в некоторой точке  $B$ , расположенной на пересечении линии визирования  $\alpha_{k\_i} = \alpha_{синт}$  и окружности с радиусом  $R_{лоц\_обі}$  с центром на оси  $Y$  в точке 1.

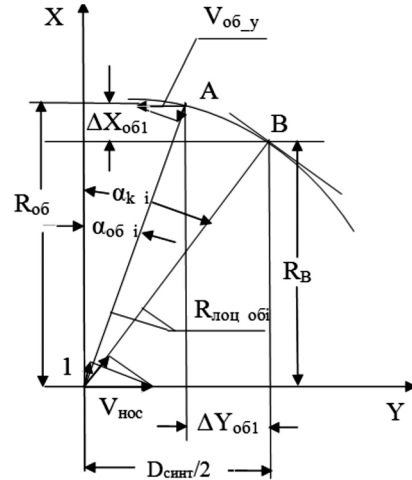


Рис. 6. Взаимное расположение носителя, объекта и его РЛИ при первом зондировании на интервале синтезирования антенны и формирования РЛИ этого объекта

При этом смещение этого сигнала по оси  $Y$  в соответствии с рис. 6 составит:

$$\Delta Y_{об1} = D_{синт} / 2 - R_{лоц\_обі} \sin \alpha_{об\_i} \quad (21)$$

или, с учетом (20) и (19),

$$\Delta Y_{об1} = \frac{D_{синт}}{2} \left[ 1 - \frac{V_{нос}}{V_{нос} - V_{об\_y}} \right] = - \frac{D_{синт}}{2} \frac{V_{об\_y}}{V_{нос} - V_{об\_y}}. \quad (22)$$

Вместе с тем, как уже отмечалось ранее, при прохождении носителем траверза лоцируемого объекта (точки 2) радиальные составляющие скоростей носителя и объекта равны нулю. Поэтому сигнал даже после обработки, согласованной с неподвижным объектом, не смещается и находится в точке, определяемой положением объекта (и носителя) по оси  $Y$  на этот момент.

Это положение определяется взаимным перемещением объекта и носителя относительно точки 1 до траверза, т.е., до их совмещения по оси  $Y$ . В соответствии с рис. 6 и выражением (22) расстояние по оси  $Y$  между объектом и носителем в точке 1 составляет:

$$\Delta Y_{нос\_об1} = \frac{D_{синт}}{2} - \Delta Y_{об1} = \frac{D_{синт}}{2} \left( 1 + \frac{V_{об\_y}}{V_{нос} - V_{об\_y}} \right) = \frac{D_{синт}}{2} \frac{V_{нос}}{V_{нос} - V_{об\_y}}. \quad (23)$$

Соответственно, к моменту достижения точки траверза (точки 2) объект (и его изображение) за счет своего движения сместится относительно точки 1 на величину:

$$\Delta Y_{об1\_2} = \Delta Y_{нос\_об1} \frac{V_{об\_y}}{V_{нос} - V_{об\_y}} = \frac{D_{синт}}{2} \frac{V_{нос} V_{об\_y}}{(V_{нос} - V_{об\_y})^2}. \quad (24)$$

При  $V_{нос} \gg V_{об\_y}$

$$\Delta Y_{об1\_2} \approx \frac{D_{синт}}{2} \frac{V_{об\_y}}{V_{нос} - 2V_{об\_y}} \approx \frac{D_{синт}}{2} \frac{V_{об\_y}}{V_{нос}}, \quad (25)$$

что примерно соответствует (22), но противоположно по знаку.

На такую же величину объект сместится при переходе из точки 2 в точку 3, соответствующую последнему зондированию рассматриваемого объекта на интервале синтезирования его РЛИ. На рис. 7 приведено расположение лоцируемого объекта и носителя при  $i$ -ом зондировании, когда носитель расположен в точке 3, а объект – в точке  $A$ . При этом необходимо учесть, что точка  $A$  по сравнению с точкой  $A$  на рис. 6 за счет движения самого объекта сместилась на величину

$$\Delta Y_{об1\_3} \approx D_{синт} \frac{V_{об\_y}}{V_{нос} - 2V_{об\_y}}. \quad (26)$$

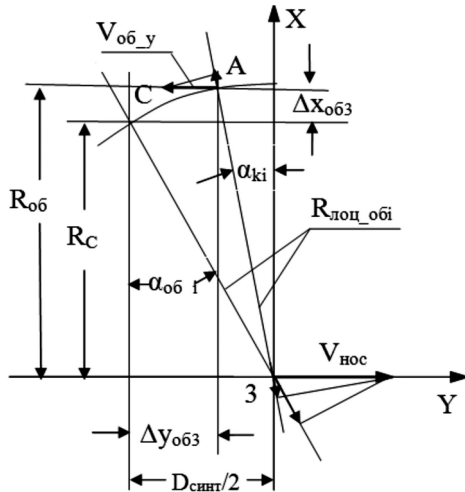


Рис. 7. Взаимное расположение носителя, объекта и его РЛИ при последнем зондировании на интервале синтезирования

Вместе с тем, как и в случае, приведенном на рис. 6, согласованная обработка входного сигнала, отраженного от движущегося объекта в точке  $A$ , произойдет в точке  $C$ , в которой выполняется условие (18). И по аналогии с (21), (22), можно показать, что

$$\Delta Y_{об3} = \frac{D_{синт}}{2} \frac{V_{об\_y}}{V_{нос} - V_{об\_y}}. \quad (27)$$

Это означает, что суммарное результирующее смещение максимума сигнала объекта за интервал синтезирования его РЛИ, обусловленное движением самого объекта и смещением максимума сигнала при его обработке (из-за не учета движения объекта), составляет

$$\Delta Y_{рез} \approx 2D_{синт} \frac{V_{об\_y}}{V_{нос}}, \quad (28)$$

и это определяет расширение ГЛ изображения объекта по азимуту. При этом, так как нарушается когерентность сигналов, принятых за интервал синтезирования, то ГЛ оказывается модулированным по амплитуде и может иметь несколько максимумов. По этой же причине нельзя однозначно определить ширину ГЛ. В качестве оценки можно использовать оценку по уровню 0,5 от максимуму амплитуды ГЛ. Изложенное иллюстрируется рис. 8, на котором приведены сечения РЛИ по оси  $Y$  и который соответствует лоцированию движущегося вдоль оси  $Y$  объекта при  $V_{об\_y} = 1$  м/с. Остальные параметры моделирования соответствуют рис. 2. Рис. 8 подтверждает

полученное ранее выражение (28) для определения расширения ГЛ при не учете тангенциальной скорости объекта, в соответствии с которым для рассматриваемого случая  $\Delta Y_{рез} = 20$  м.

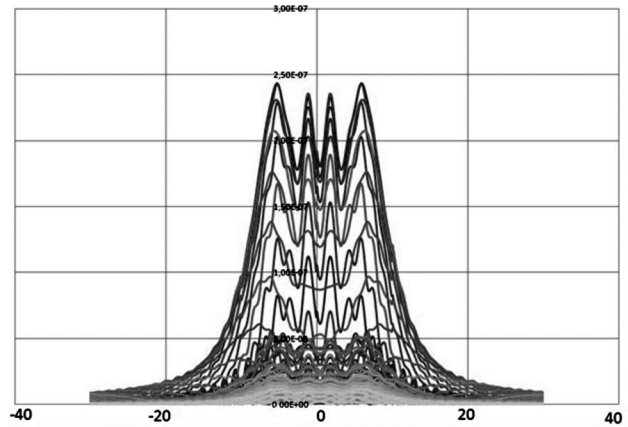


Рис. 8. Сечения РЛИ по оси  $Y$ , соответствующие лоцированию движущегося вдоль оси  $Y$  объекта при  $V_{об\_y} = 1$  м/с,  $V_{нос\_y} = 100$  м/с и  $D_{синт} = 1000$  м

На рис. 9 приведены результаты моделирования РСА в виде сечений РЛИ в азимутальной плоскости при наличии единственного отражателя с координатами на начало моделирования  $x_{об0} = 10000$  м (т.е.  $R_{об} = 10$  км),  $y_{об0} = 0$  при  $V_{нос\_y} = 100$  м/с,  $V_{об\_y} = 2$  м/с и  $D_{синт} = 400$  м. Координаты носителя на начало моделирования составляли  $x_{нос0} = 0$ ,  $y_{нос0} = -210$  м. При этих условиях в соответствии с выражением (28) расширение ГЛ равно 16 м, что соответствует ширине ГЛ примерно по уровню 0,5 на рис. 9.

При этом, как уже отмечалось ранее, положение центра ГЛ РЛИ объекта по азимуту соответствует положению объекта на момент прохождения носителем траверза объекта, а это есть момент  $t_{тр}$ , когда  $y_{об} = y_{нос}$ . Исходя из уравнений движения объекта и носителя по оси  $Y$ , нетрудно получить, что относительно начала моделирования  $t_{тр}$  определяется выражением:

$$t_{тр} = (y_{об0} - y_{нос0}) / (V_{об\_y} - V_{нос\_y}),$$

и для рассматриваемого случая  $t_{тр} = 2,14$  с, а положение объекта (и носителя) на этот момент по оси  $Y$  равно 4,28 м, что хорошо соответствует рис. 9.

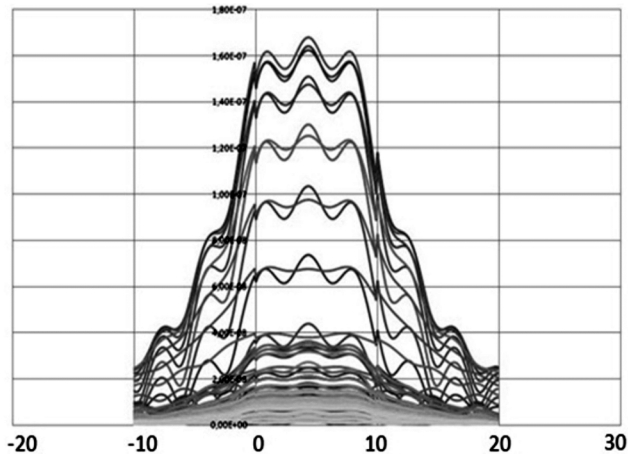
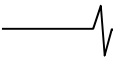


Рис. 9. Сечения в азимутальной плоскости РЛИ отражателя с координатами на начало моделирования  $x_{об0} = 10000$  м,  $y_{об0} = 0$  при  $V_{об\_y} = 2$  м/с,  $V_{нос\_y} = 100$  м/с и  $D_{синт} = 400$  м



Непосредственно из рис. 6 и 7 следует, что движение объекта с тангенциальной скоростью, неучтенной при обработке, не только расширяет ГЛ отклика (РЛИ объекта) по азимуту, но и на этапе синтезирования меняется дальность до него. Вследствие этого при отрицательной скорости объекта отклик изгибается вниз, как показано на рис. 10, или вверх при положительной скорости.

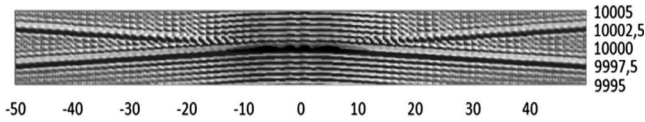


Рис. 10. РЛИ (в координатах  $X, Y$ ) отражателя при  $x = 10000$  м,  $y = 0$  и  $V_{об,y} = -1$  м/с

Порядок величины изменения дальности можно оценить на примере рис. 6 (первая точка лоцирования объекта на интервале формирования его РЛИ). Значение этого изменения равно

$$\Delta X_{об1} = R_{об} - R_B. \quad (29)$$

Исходя из рис. 6, а также полагая, что углы  $\alpha_{об,i}$  и  $\alpha_{k,i}$  значительно меньше 1, можно записать:  $\Delta X_{об1} = R_{лоц,об1} \times$

$\times (\cos \alpha_{об,i} - \cos \alpha_{k,i}) \approx R_{лоц,об1} (\alpha_{k,i}^2 - \alpha_{об,i}^2)$  Для 1-й точки  $\alpha_{k,i} \approx D_{синт}/2 R_{лоц,об1}$ , а, исходя из выражения (19), следует:

$$\Delta X_{об1} \approx \frac{D_{синт}^2 V_{об,y}}{2 R_{об} V_{нос,y}}. \quad (30)$$

Для примера, при  $V_{нос,y} = 100$  м/с,  $V_{об,y} = 1$  м/с,  $R_{об} = 10000$  м,  $D_{синт} = 1000$  м расчетное смещение в 1-й точке  $\Delta X_{об1} = 0,5$  м.

### Заключение

В радиолокаторах бокового обзора, предназначенных для мониторинга земной и водной поверхности и осуществляющих обработку, согласованную с неподвижной местностью, лоцирование движущихся объектов в общем случае приводит к искажению и смещению РЛИ этих объектов. Наличие радиальной составляющей скорости лоцируемого объекта практически не искажает форму РЛИ этого объектов, но приводит к его смещению

на местности. Это смещение в продольном и поперечном относительно траектории носителя РСА направлениях пропорционально дальности до лоцируемого объекта. Одновременно в продольном направлении смещение пропорционально отношению радиальной скорости объекта к скорости носителя и может достигать существенных значений, которые необходимо учитывать как при реальных работах, так и при моделировании. Поперечные смещения незначительны.

При наличии у скорости объекта тангенциальной составляющей основные изменения его РЛИ связаны со значительным расширением этого РЛИ в продольном (азимутальном) направлении. Расширение пропорционально интервалу синтезирования и отношению продольной скорости объекта и скорости носителя. При этом центр РЛИ объекта привязан по своему положению к положению объекта при прохождении носителем его траверза (с учетом тангенциальной составляющей скорости объекта). При указанном расширении РЛИ в азимутальном направлении появляется некоторое смещение краев этого РЛИ по дальности. Поэтому РЛИ объекта имеет вид дужки.

Полученные соотношения позволяют оценивать смещения и расширения РЛИ движущихся объектов.

### Литература

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. – М.: Радиотехника. 2005.
2. Брызгалов А.П., Караулова Е.В., Хныкин А.В. Аналого-цифровая обработка информации в радиолокаторах с синтезированной апертурой, использующих сверхширокополосные сигналы с линейной частотной модуляцией. // Цифровая обработка сигналов. №4, 2004 г.
3. Брызгалов А.П., Ковальчук И.В., Хныкин А. В., Шелва И. А., Юсупов Р. Г. Моделирование радиолокатора с синтезированной апертурой при решении задач его внутреннего и внешнего проектирования. Электронный журнал «Труды МАИ», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), №43, март 2011.