

УДК 621.396.96

## ТРЕБОВАНИЕ К ТОЧНОСТИ ЗАДАНИЯ ТРАЕКТОРИИ НОСИТЕЛЯ РСА ПРИ ИМИТАЦИИ ЭХО-СИГНАЛА ОТ ПОВЕРХНОСТНО- РАСПРЕДЕЛЕННОГО ОБЪЕКТА

Р. Ю. Белоруцкий, А. В. Киселев

Новосибирский государственный технический университет

Получена 26 сентября 2011 г.

**Аннотация.** Рассмотрен вопрос имитации эхо-сигналов от земной поверхности при работе РЛС в режиме картографирования с синтезированием апертуры антенны. Получены аналитические соотношения для оценки смещения отметки от точечного отражателя на радиолокационном изображении в результате неточности задания моделируемой траектории носителя РЛС.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование эхо-сигналов, радиолокация, синтезирование апертуры.

**Abstract.** The simulation of echo signals reflected from the Earth surface for mapping mode of synthetic aperture radar is considered. The analytical expressions for estimating point reflector pip displacement on radar image as a result of inaccuracy in setting the modeled SAR sensor trajectory are obtained.

**Keywords:** radar echo simulation modeling, radiolocation, aperture synthesis.

### Введение

Ввиду сложности и больших материальных затрат на натурные испытания на этапах проектирования, отладки, отработки режимов работы радиолокационных станций получило распространение проведение полунатурных экспериментов [1]. В этом случае в лабораторных условиях производится моделирование радиолокационной обстановки путем подачи на вход приемника РЛС соответствующих сигналов и помех. Технически это осуществляется с помощью специальных аппаратно-программных средств –

имитаторов. Как правило, они формируют отсчеты комплексной огибающей имитируемого сигнала, потом преобразуют их в аналоговый сигнал и переносят в область рабочих частот РЛС. Например, в случае радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) они должны адекватно имитировать эхо-сигналы, отражаемые от поверхности и, в результате, формировать радиолокационное изображение (РЛИ) местности.

Наибольшую сложность в реализации аппаратно-программных средств при имитации представляет собой формирование отсчетов имитируемых сигналов и помех. Они должны формироваться в реальном масштабе времени (РМВ) с учетом текущих параметров моделируемой ситуации (параметров зондирующих сигналов РЛС, положения и скорости носителя на моделируемой траектории и др.).

Высокая разрешающая способность радиолокационных станций с синтезированной апертурой (РСА), используемых в системах ДЗЗ, устанавливает жесткие требования по соответствию имитируемых сигналов реальным эхо-сигналам. Большинство объектов на радиолокационных изображениях, получаемых РСА, обладают сложной многоточечной структурой. При имитации эхо-сигнал от сложного объекта представляется совокупностью сигналов от элементарных точечных отражателей [1]. При этом комплексная огибающая входного сигнала РЛС формируется как сумма сигналов от отдельных независимых точечных отражателей в координатах, соответствующих РЛИ:

$$\dot{U}(t) = \sum_{i=1}^N A_i \dot{U}_{\text{зонд.}}(t - \tau_{z_i}(t)) e^{j\varphi_i(t)}, \quad (1)$$

где  $A_i$  и  $\varphi_i(t)$  – амплитуда и текущая фаза эхо-сигнала от  $i$ -го отражателя;  $\dot{U}_{\text{зонд.}}(t)$  – комплексная огибающая зондирующего сигнала;  $\tau_{z_i}(t)$  – время задержки сигнала, отраженного от  $i$ -го отражателя;  $N$  – количество точек, формирующих РЛИ.

Сигналу от каждого отражателя соответствуют свои функции изменения задержки и фазы во времени.

Отсчеты сигнала имитатора должны представлять собой дискретизированную во времени комплексную огибающую  $\dot{U}(t)$ .

Реализация (1) обеспечивает высокую степень соответствия реальному эхо-сигналу, но при высоком разрешении требует огромных вычислительных ресурсов. Это существенно ограничивает возможность непосредственного использования (1) для формирования отсчетов имитируемого сигнала в РМВ.

С целью снижения вычислительных затрат в [2] предложен следующий способ формирования отсчетов комплексной огибающей сигнала. До начала имитации согласно (1) рассчитываются отсчеты комплексной огибающей сигнала для зондируемого участка поверхности и некоторой предполагаемой траектории носителя. Из  $\dot{U}(t)$  устраняется набег фазы и задержка сигнала от центральной точки участка (назовем её *опорной*): их значения вычитаются из текущих значений фаз и задержек сигналов от каждого эквивалентного отражателя, образующих участок поверхности. Таким образом, получается сигнал, сохраняющий информацию о фазовых и временных соотношениях, присущих эхо-сигналу от поверхности. Во время имитации вводится операция его преобразования в имитируемый эхо-сигнал. В процессе моделируемого полета носителя РЛС точно рассчитываются и устанавливаются текущие значения задержки и фазового сдвига сигнала для центральной точки участка. При этом для остальных точек они меняются пропорционально значению от опорной согласно взаимосвязям в исходном сигнале. Эта процедура призвана свести к минимуму количество вычислений: из расчетов в РМВ исключается сложный расчет законов изменения фаз  $\varphi_i(t)$  и задержек  $\tau_{z_i}(t)$  парциальных сигналов в составе имитируемого эхо-сигнала, а также выполнение расчета (1).

Практическому использованию рассматриваемого способа препятствует то, что траектория носителя при проведении эксперимента может отличаться от предполагаемой, или начало синтезирования апертуры может начинаться в

иной её точке, нежели предполагалось заранее. При этом возникает проблема, состоящая в отклонении задаваемого положения носителя РЛС при формировании эхо-сигнала от реального положения в ходе испытания. Это может приводить к искажению формируемого радиолокационного изображения. Вместе с тем до определенной степени отклонение может не влиять или влиять незначительно на РЛИ. При имитации крайне важно знать допустимые пределы ошибки взаимного положения носителя РСА и зондируемого участка поверхности; знать, насколько заранее рассчитанный сигнал устойчив к траекторным отклонениям. Исходя из допустимых значений ошибок легко определить границы объема пространства, при полете носителя в котором, можно использовать подготовленный заранее сигнал.

Известные из теории радиолокации подходы к оценке влияния траекторных нестабильностей [3] в данном случае не применимы. Для предлагаемого алгоритма имитации мы имеем природу образования ошибки, принципиально отличающуюся от ошибок, вызываемых траекторными нестабильностями при синтезировании апертуры. Мы абсолютно точно рассчитываем отсчеты сигнала для опорной точки. В нашем случае при неточном задании траектории ошибки проявляются и растут по мере удаления от опорной точки к краям картографируемого участка поверхности.

Поскольку расчет значений фаз и задержек сигналов от точек РЛИ выполняется исходя из значений предполагаемой дальности до носителя РЛС, неточность задания траектории приведет к появлению ошибок в значениях  $\varphi_i(t)$  и  $\tau_{zi}(t)$ , участвующих в (1). Это ведет к ошибкам в позиционировании эквивалентных точечных отражателей по путевой и наклонной дальностям соответственно.

### **Цель работы**

Определить зависимость ошибок в установке положения точечного отражателя от неточности задания траектории носителя РСА при имитации эхо-сигнала.

## Постановка задачи

Будем оценивать ошибки в установке положения имитируемого отражателя по дальности и азимуту.

Рассмотрим положение носителя РЛС в некой точке траектории полета. Для режима синтезирования апертуры траектория может быть представлена дискретным набором точек (набором последовательных положений носителя в пространстве, определяемых частотой повторения зондирующих импульсов). Если для любой точки траектории отклонение носителя РСА не будет превышать допустимой величины, то влияние отклонений на всем протяжении траектории будет оставаться в допустимых пределах, определяемых условием невыхода имитируемого отражателя за границы элемента разрешения РЛС.

На рис. 1 изображена система координат. Пусть исходный сигнал рассчитывается точно для опорного точечного отражателя, расположенного в точке с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$ .

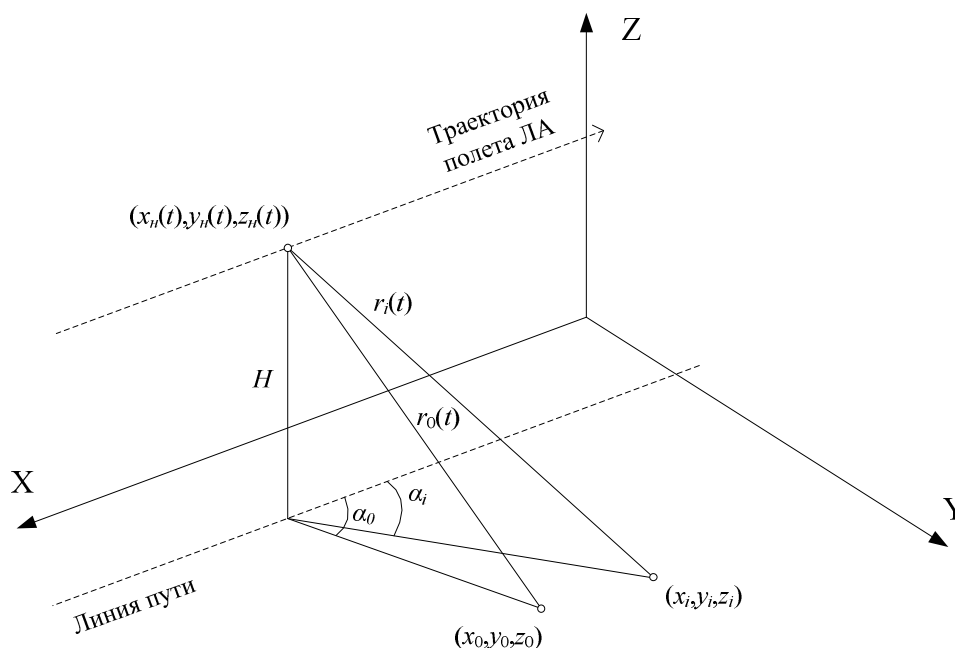


Рис. 1. Расположение носителя РСА и имитируемого отражателя

В ходе полунатурного испытания необходимо преобразовать этот сигнал в эхо-сигнал от отражателя, расположенного в точке с координатами  $(x_i, y_i, z_i)$ .

Обозначим текущее расстояние от РСА до точки  $(x_0, y_0, z_0)$  как  $r_0(t)$ , а расстояние до имитируемого точечного отражателя как  $r_i(t)$ :

$$r_0(t) = \sqrt{(x_0 - x_n(t))^2 + (y_0 - y_n(t))^2 + (z_0 - z_n(t))^2};$$

$$r_i(t) = \sqrt{(x_i - x_n(t))^2 + (y_i - y_n(t))^2 + (z_i - z_n(t))^2},$$

где  $(x_n, y_n, z_n)$  – координаты носителя РСА;  $x_i = x_0 + \Delta x_i$ ,  $y_i = y_0 + \Delta y_i$ ,  $z_i = z_0 + \Delta z_i$ ;  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$  – сдвиг  $i$ -го отражателя по соответствующей координатной оси относительно положения опорной точки  $(x_0, y_0, z_0)$ .

Формирование сигнала должно осуществляться согласно модели траекторного сигнала от точечного объекта [1]:

$$\dot{s}_{T_i}(t) = A_i \cdot F_{n.n.}(\alpha_i(t), \theta_i(t)) \cdot \dot{U}_{зонд.}(t - \tau_{zi}(t)) \cdot \exp(-j[\psi_{ri}(t) - \phi_{0i}]), \quad (2)$$

где  $\psi_{ri}(t)$  – закон изменения фазы сигнала, отражаемого точечной целью;  $\phi_{0i}$  – фаза переотражения;  $F_{n.n.}(\alpha_i(t), \theta_i(t))$  – нормированная функция, характеризующая функцию модуляции ДН реальной антенны РСА при передаче и приеме сигнала;  $\alpha_i, \theta_i$  – углы визирования объекта в азимутальной и угломестной плоскостях.

Для имитации эхо-сигнала от отражателя, находящегося на дальности  $r_i$ , необходимо осуществлять коррекцию задержки сигнала на величину  $\Delta \tau_{zi}$  по сравнению с задержкой сигнала от опорной точки:

$$\Delta \tau_{zi}(t) = \tau_{zi}(t) - \tau_{z0}(t) = 2(r_i(t) - r_0(t))/c, \quad (3)$$

где  $\tau_{z0}, \tau_{zi}$  – времена задержки сигнала при распространении до точек  $(x_0, y_0, z_0)$  и  $(x_i, y_i, z_i)$  соответственно;  $c$  – скорость распространения радиоволн.

Также необходимо производить изменение фазы сигнала на величину:

$$\Delta \psi_i(t) = \psi_{ri}(t) - \psi_{r0}(t) = 2k(r_i(t) - r_0(t)), \quad (4)$$

где  $\psi_{r_0}(t)$ ,  $\psi_{r_i}(t)$  – фазовые набегии при распространении сигнала до точек  $(x_0, y_0, z_0)$  и  $(x_i, y_i, z_i)$  соответственно;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны РСА.

Величины дополнительных задержки  $\Delta\tau_{zi}$  и фазового сдвига  $\Delta\psi_i$  определяются разностью расстояний  $r_i$  и  $r_0$ , каждое из которых рассчитывается как функция от координат:

$$r_i = f(x_i, y_i, z_i, x_{н.з.}, y_{н.з.}, z_{н.з.}); \quad r_0 = f(x_0, y_0, z_0, x_{н.з.}, y_{н.з.}, z_{н.з.}).$$

Координаты носителя РСА  $(x_{н.з.}, y_{н.з.}, z_{н.з.})$ , задаваемые при расчете исходного сигнала, могут отличаться от координат определяемых условиями эксперимента:

$$x_{н.з.} = x_{н.и.} + \Delta x_n; \quad y_{н.з.} = y_{н.и.} + \Delta y_n; \quad z_{н.з.} = z_{н.и.} + \Delta z_n,$$

где  $\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n$  – величины отклонения носителя по соответствующим координатам.

Это обстоятельство приведет к ошибке в значениях фазы и задержки имитируемого сигнала, следовательно, к отклонению имитируемого отражателя от задаваемых координат.

### Смещение по дальности

Представим расстояния  $r_i$  и  $r_0$  как функции от отклонений координат носителя  $\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n$ :

$$r_i(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) = \sqrt{(x_i - x_{н.и.} - \Delta x_n)^2 + (y_i - y_{н.и.} - \Delta y_n)^2 + (z_i - z_{н.и.} - \Delta z_n)^2};$$

$$r_0(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) = \sqrt{(x_0 - x_{н.и.} - \Delta x_n)^2 + (y_0 - y_{н.и.} - \Delta y_n)^2 + (z_0 - z_{н.и.} - \Delta z_n)^2}.$$

Тогда соответствующие отклонения расстояний:

$$\Delta r_i(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) = r_i(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) - r_i(0,0,0);$$

$$\Delta r_0(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) = r_0(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) - r_0(0,0,0).$$

А отклонение разности расстояний будет равно:

$$\Delta\Delta r_i(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) = \Delta r_i(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) - \Delta r_0(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n). \quad (5)$$

Поскольку задержка зондирующего сигнала однозначно связана с расстоянием до объекта наблюдения, смещение отметки от точечного объекта по координате дальности будет определяться значением  $\Delta\Delta r_i$ .

Проанализируем влияние отклонений  $\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n$  на величину  $\Delta\Delta r_i$ . Для этого представим каждую из функций  $r_i(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n)$  и  $r_0(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n)$  в виде ряда Маклорена. Вследствие малости, члены выше второго порядка можно не учитывать:

$$r_i(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) \approx r_i(0,0,0) + \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} \Delta x_n + \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} \Delta y_n + \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} \Delta z_n;$$

$$r_0(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) \approx r_0(0,0,0) + \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} \Delta x_n + \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} \Delta y_n + \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} \Delta z_n.$$

Тогда отклонения расстояний:

$$\Delta r_i(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) \approx \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} \Delta x_n + \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} \Delta y_n + \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} \Delta z_n;$$

$$\Delta r_0(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) \approx \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} \Delta x_n + \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} \Delta y_n + \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} \Delta z_n,$$

а отклонение разности расстояний:

$$\Delta\Delta r_i(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) \approx \left( \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} - \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} \right) \Delta x_n + \left( \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} - \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} \right) \Delta y_n + \left( \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} - \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} \right) \Delta z_n, \quad (6)$$

где

$$\frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} = \frac{-(x_0 + \Delta x_i - x_{н.и.})}{\sqrt{(x_0 + \Delta x_i - x_{н.и.})^2 + (y_0 + \Delta y - y_{н.и.})^2 + (z_0 + \Delta z_i - z_{н.и.})^2}};$$

$$\frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} = \frac{-(x_0 - x_{н.и.})}{\sqrt{(x_0 - x_{н.и.})^2 + (y_0 - y_{н.и.})^2 + (z_0 - z_{н.и.})^2}}.$$

Аналогично выглядят выражения для  $\frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta y_n}$ ,  $\frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta y_n}$ ,  $\frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta z_n}$ ,  $\frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta z_n}$ .

Теперь обозначим  $\frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta x_n}$  как функцию от переменных  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$  и

представим её также в виде ряда Маклорена:

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} &= \\ &= W_x(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i) \approx W_x(0,0,0) + \frac{\partial W_x(0,0,0)}{\partial \Delta x_i} \Delta x_i + \frac{\partial W_x(0,0,0)}{\partial \Delta y_i} \Delta y_i + \frac{\partial W_x(0,0,0)}{\partial \Delta z_i} \Delta z_i. \end{aligned}$$

Здесь члены второго и высших порядков можно также опустить.

Составляющая  $W_x(0,0,0) = \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta x_n}$  после подстановки в (6) сократится. С

учетом этого, коэффициент перед переменной  $\Delta x_n$  в (6):

$$\left( \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} - \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} \right) \approx \frac{\partial W_x(0,0,0)}{\partial \Delta x_i} \Delta x_i + \frac{\partial W_x(0,0,0)}{\partial \Delta y_i} \Delta y_i + \frac{\partial W_x(0,0,0)}{\partial \Delta z_i} \Delta z_i.$$

После проведения аналогичных преобразований с коэффициентами

$\left( \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} - \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} \right)$  и  $\left( \frac{\partial r_i(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} - \frac{\partial r_0(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} \right)$  получено выражение:

$$\begin{aligned} \Delta \Delta r_i &\approx \\ &\approx \left[ \left[ -\frac{1}{\sqrt{B}} + \frac{(x_0 - x_{н.у.})^2}{\sqrt{B^3}} \right] \Delta x_i + \frac{(x_0 - x_{н.у.})(y_0 - y_{н.у.})}{\sqrt{B^3}} \Delta y_i + \frac{(x_0 - x_{н.у.})(z_0 - z_{н.у.})}{\sqrt{B^3}} \Delta z_i \right] \Delta x_n + \\ &+ \left[ \frac{(y_0 - y_{н.у.})(x_0 - x_{н.у.})}{\sqrt{B^3}} \Delta x_i + \left[ -\frac{1}{\sqrt{B}} + \frac{(y_0 - y_{н.у.})^2}{\sqrt{B^3}} \right] \Delta y_i + \frac{(y_0 - y_{н.у.})(z_0 - z_{н.у.})}{\sqrt{B^3}} \Delta z_i \right] \Delta y_n + \\ &+ \left[ \frac{(z_0 - z_{н.у.})(x_0 - x_{н.у.})}{\sqrt{B^3}} \Delta x_i + \frac{(z_0 - z_{н.у.})(y_0 - y_{н.у.})}{\sqrt{B^3}} \Delta y_i + \left[ -\frac{1}{\sqrt{B}} + \frac{(z_0 - z_{н.у.})^2}{\sqrt{B^3}} \right] \Delta z_i \right] \Delta z_n, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $B = (x_0 - x_{н.у.})^2 + (y_0 - y_{н.у.})^2 + (z_0 - z_{н.у.})^2$ .

Согласно (7) величина  $\Delta \Delta r_i$  связана с величинами отклонений координат носителя РЛС через весовые коэффициенты, значения которых зависят от положения носителя и имитируемого точечного отражателя относительно точки  $(x_0, y_0, z_0)$ :  $\Delta \Delta r_i = K_{\Delta x_n} \cdot \Delta x_n + K_{\Delta y_n} \cdot \Delta y_n + K_{\Delta z_n} \cdot \Delta z_n$ .

## Смещение по азимуту

Оценим влияние неточности задания координат носителя РСА на положение по азимуту отметки от имитируемого отражателя.

Пусть РСА работает в режиме доплеровского облучения луча (ДОЛ), угол наблюдения земной поверхности соответствует переднебоковому обзору (рис. 2). Носитель РЛС движется прямолинейно и равномерно. Линия пути (ЛП) расположена параллельно оси ОХ, строка РЛИ формируется вдоль ЛП. Вследствие неточности задания координат носителя РЛС отметка от имитируемой точечной цели на РЛИ будет смещаться. Пусть смещение происходит только по путевой дальности, в пределах одной строки РЛИ.

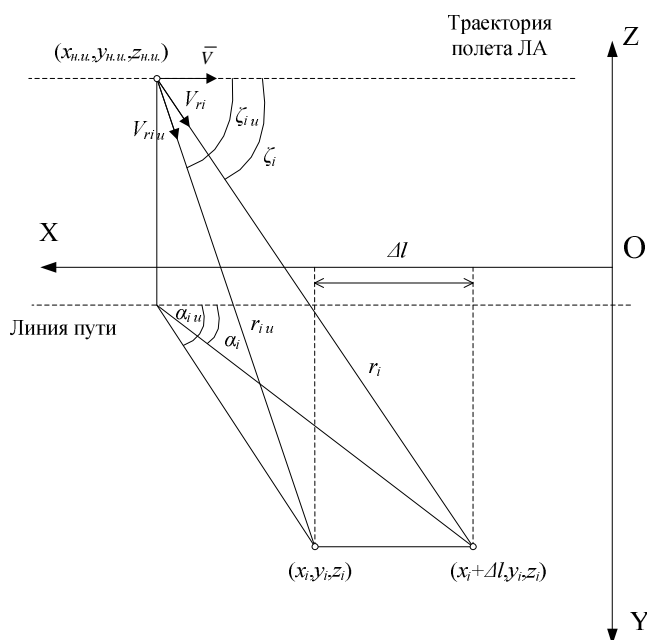


Рис. 2. Схема предполагаемого смещения отметки по путевой дальности

Представим изменение во времени фазового набега сигнала (4) как соответствующее изменение доплеровской частоты сигнала. Для преобразования исходного сигнала в сигнал от имитируемого отражателя в режиме ДОЛ необходимо изменение его несущей частоты на значение разности доплеровских частот сигналов от имитируемого отражателя и опорной точки:

$$\Delta\omega_D = \omega_{Di} - \omega_{D0} = \frac{2 \cdot \omega_0}{c} V_{ri} - \frac{2 \cdot \omega_0}{c} V_{r0},$$

где  $\omega_{D0}$ ,  $\omega_{Di}$  – доплеровские частоты эхо-сигналов от опорной точки и имитируемого отражателя;  $V_{ri}$  и  $V_{r0}$  – радиальные составляющие путевой скорости  $\bar{V}$  относительно имитируемого отражателя и опорной точки;  $\omega_0$  – частота зондирующего сигнала.

Составляющие  $V_{ri}$  и  $V_{r0}$  представляют собой проекции вектора скорости  $\bar{V}$  на направления  $\bar{r}_i$  и  $\bar{r}_0$  визирования точек  $(x_i, y_i, z_i)$  и  $(x_0, y_0, z_0)$ :

$$V_{ri} = |\bar{V}| \cdot \cos \zeta_i; \quad V_{r0} = |\bar{V}| \cdot \cos \zeta_0,$$

тогда

$$\Delta\omega_D = \frac{2 \cdot \omega_0}{c} |\bar{V}| (\cos \zeta_i - \cos \zeta_0). \quad (8)$$

Итак, разность доплеровских частот пропорциональна разности косинусов углов  $\Delta\omega \sim (\cos \zeta_i - \cos \zeta_0)$ .

Косинусы углов наблюдения точек  $\zeta_i$  и  $\zeta_0$  находятся как:

$$\cos \zeta_i = \frac{x_i - x_{н.э.}}{r_i}; \quad \cos \zeta_0 = \frac{x_0 - x_{н.э.}}{r_0}.$$

Неточность задания координат носителя РСА приведет к отклонению значений  $\cos \zeta_i$  и  $\cos \zeta_0$  от предполагаемых при формировании исходного сигнала.

Обозначим  $\cos \zeta_i$  и  $\cos \zeta_0$  как функции  $C_{\zeta_i}$  и  $C_{\zeta_0}$  от переменных  $\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n$ :

$$C_{\zeta_i}(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) = \frac{x_i - x_{н.у.} - \Delta x_n}{\sqrt{(x_i - x_{н.у.} - \Delta x_n)^2 + (y_i - y_{н.у.} - \Delta y_n)^2 + (z_i - z_{н.у.} - \Delta z_n)^2}};$$

$$C_{\zeta_0}(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) = \frac{x_0 - x_{н.у.} - \Delta x_n}{\sqrt{(x_0 - x_{н.у.} - \Delta x_n)^2 + (y_0 - y_{н.у.} - \Delta y_n)^2 + (z_0 - z_{н.у.} - \Delta z_n)^2}}.$$

Тогда соответствующие отклонения  $C_{\zeta_i}$  и  $C_{\zeta_0}$ :

$$\Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) = C_{\zeta_i}(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) - C_{\zeta_i}(0,0,0);$$

$$\Delta C_{\zeta_0}(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) = C_{\zeta_0}(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) - C_{\zeta_0}(0,0,0).$$

Разность доплеровских частот при неточности задания положения носителя:

$$\begin{aligned}\Delta\omega_D &= \frac{2 \cdot \omega_0}{c} |\bar{V}| (C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H) - C_{\zeta_0}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H)) = \\ &= \frac{2 \cdot \omega_0}{c} |\bar{V}| (C_{\zeta_i}(0,0,0) + \Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H) - C_{\zeta_0}(0,0,0) - \Delta C_{\zeta_0}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H)) = \\ &= \frac{2 \cdot \omega_0}{c} |\bar{V}| (C_{\zeta_i}(0,0,0) - C_{\zeta_0}(0,0,0) + \Delta\Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H)),\end{aligned}$$

где  $\Delta\Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H)$  – отклонение разности косинусов углов наблюдения имитируемого отражателя и опорной точки.

Величина отклонения разности доплеровских частот соответственно равна:

$$\Delta\Delta\omega_D = \frac{2 \cdot \omega_0}{c} |\bar{V}| \cdot \Delta\Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H). \quad (9)$$

Так как азимутальная координата в режиме ДОЛ определяется доплеровской частотой сигнала [3], смещение имитируемого отражателя пропорционально значению  $\Delta\Delta\omega_D$ .

Для анализа влияния  $\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H$  на величину  $\Delta\Delta\omega_D$  достаточно проследить их влияние на  $\Delta\Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H)$ :

$$\begin{aligned}\Delta\Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H) &= \Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H) - \Delta C_{\zeta_0}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H) = \\ &= C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H) - C_{\zeta_i}(0,0,0) - C_{\zeta_0}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H) + C_{\zeta_0}(0,0,0).\end{aligned} \quad (10)$$

Аналогично операциям, проделанным ранее для  $\Delta\Delta r_i$ , представим каждую из функций  $C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H)$  и  $C_{\zeta_0}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H)$  в виде ряда Маклорена первого порядка:

$$\begin{aligned}C_{\zeta_i}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H) &= C_{\zeta_i}(0,0,0) + \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta x_H} \Delta x_H + \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta y_H} \Delta y_H + \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta z_H} \Delta z_H; \\ C_{\zeta_0}(\Delta x_H, \Delta y_H, \Delta z_H) &= C_{\zeta_0}(0,0,0) + \frac{\partial C_{\zeta_0}(0,0,0)}{\partial \Delta x_H} \Delta x_H + \frac{\partial C_{\zeta_0}(0,0,0)}{\partial \Delta y_H} \Delta y_H + \frac{\partial C_{\zeta_0}(0,0,0)}{\partial \Delta z_H} \Delta z_H.\end{aligned}$$

Тогда функции  $\Delta C_{\zeta_i}$ ,  $\Delta C_{\zeta_0}$  и  $\Delta\Delta C_{\zeta_i}$ :

$$\begin{aligned} \Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) &= \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} \Delta x_n + \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} \Delta y_n + \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} \Delta z_n; \\ \Delta C_{\zeta_0}(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) &= \frac{\partial C_{\zeta_0}(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} \Delta x_n + \frac{\partial C_{\zeta_0}(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} \Delta y_n + \frac{\partial C_{\zeta_0}(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} \Delta z_n; \\ \Delta\Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) &= \left( \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} - \frac{\partial C_{\zeta_0}(0,0,0)}{\partial \Delta x_n} \right) \Delta x_n + \left( \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} - \frac{\partial C_{\zeta_0}(0,0,0)}{\partial \Delta y_n} \right) \Delta y_n + \\ &+ \left( \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} - \frac{\partial C_{\zeta_0}(0,0,0)}{\partial \Delta z_n} \right) \Delta z_n. \end{aligned} \tag{11}$$

После разложения в ряд Маклорена по переменным  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$  функций  $\frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta x_n}, \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta y_n}, \frac{\partial C_{\zeta_i}(0,0,0)}{\partial \Delta z_n}$ , выражение (11) примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta\Delta C_{\zeta_i}(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n) &= \\ &= \left[ 3 \left[ \frac{\Delta x}{\sqrt{B^3}} - \frac{\Delta x^3}{\sqrt{B^5}} \right] \Delta x_i + \left[ \frac{\Delta y}{\sqrt{B^3}} - \frac{3\Delta x^2 \cdot \Delta y}{\sqrt{B^5}} \right] \Delta y_i + \left[ \frac{\Delta z}{\sqrt{B^3}} - \frac{3\Delta x^2 \cdot \Delta z}{\sqrt{B^5}} \right] \Delta z_i \right] \Delta x_n + \\ &+ \left[ \left[ \frac{\Delta y}{\sqrt{B^3}} - \frac{3\Delta y \cdot \Delta x^2}{\sqrt{B^5}} \right] \Delta x_i + \left[ \frac{\Delta x}{\sqrt{B^3}} - \frac{3\Delta x \cdot \Delta y^2}{\sqrt{B^5}} \right] \Delta y_i - \frac{3\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{\sqrt{B^5}} \Delta z_i \right] \Delta y_n + \\ &+ \left[ \left[ \frac{\Delta z}{\sqrt{B^3}} - 3 \cdot \frac{\Delta z \cdot \Delta x^2}{\sqrt{B^5}} \right] \Delta x_i - \frac{3\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{\sqrt{B^5}} \Delta y_i + \left[ \frac{\Delta x}{\sqrt{B^3}} - 3 \cdot \frac{\Delta x \cdot \Delta z^2}{\sqrt{B^5}} \right] \Delta z_i \right] \Delta z_n, \end{aligned} \tag{12}$$

где  $\Delta x = (x_0 - x_{н.и.})$ ,  $\Delta y = (y_0 - y_{н.и.})$ ,  $\Delta z = (z_0 - z_{н.и.})$ .

В (12) величина  $\Delta\Delta C_{\zeta_i}$  связана с величинами отклонений  $\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n$  через весовые коэффициенты подобно (7) для  $\Delta\Delta r_i$ .

С помощью математического моделирования проверена возможность использования (12) для режима синтезирования апертуры.

## Результаты моделирования

С целью иллюстрации и проверки полученных теоретических результатов для режима синтезирования апертуры антенны проведем математическое моделирование. Рассмотрим радиолокационные изображения (рис. 3), полученные при следующих условиях:

- Путьевая скорость носителя РЛС  $V = 128$  м/с;
- Частота зондирующего сигнала  $f_0 = 10$  ГГц;
- Время синтезирования апертуры антенны:  $T = 2$  с;
- $\Delta x_n = \Delta y_n = \Delta z_n = 1000$  м.
- В момент начала синтезирования ЛА находится в положении:

$$H = |z_0 - z_{н.у.}| = 10000 \text{ м}, r_0 = 25 \text{ км}, \alpha_0 = 60^\circ.$$

В процессе синтезирования носитель РСА осуществляет прямолинейное равномерное движение вдоль ЛП параллельной оси X. Строка РЛИ формируется параллельно ЛП. Считаем, что ось горизонтальной дальности параллельна оси Y (перпендикулярна ЛП). За время синтезирования меняется относительное смещение  $(x_0 - x_{н.у.} - V \cdot t)$ ,  $t \in [0; T]$ .

Масштаб РЛИ составляет 1 м/1 пиксель. В качестве зондирующего сигнала используется простой радиоимпульс.

На РЛИ присутствуют 9 отметок от точечных отражателей. В центре расположена отметка от опорной точки  $(x_0, y_0, z_0)$ . Её положение остается неизменным, т.к. координаты носителя для неё определены точно. Остальные 8 отметок принадлежат имитируемым отражателям, смещенным на значения  $(\Delta x_i; \Delta y_i)$  по осям X и Y относительно опорной точки  $(x_0, y_0)$  (рис. 3):

$$(-50; -50), (0; -50), (50; -50), (50; 0), (50; 50), (0; 50), (-50; 50), (-50; 0) \text{ [м]}.$$

В результате неточности задания траектории носителя РСА их положение изменяется. Рассмотрим случай отражателя  $(50; 50)$ . Исходя из полученных соотношений, для него

$$\Delta \Delta C_{\zeta_i} = 1.24 \cdot 10^{-4} \text{ (согласно (12)); } \Delta \Delta \omega_D = 6.67 \text{ рад/с (} \Delta \Delta f_D = 1.06 \text{ Гц)}.$$

По значению отклонения доплеровской частоты сигнала  $\Delta\omega_D$  определим смещение отметки  $\Delta l_i$  от имитируемого отражателя по азимутальной координате на РЛИ. Рассмотрим случай работы РЛС в режиме ДОЛ. Пусть имеются два точечных отражателя: один с координатами равными координатам имитируемого отражателя  $(x_i, y_i, z_i)$ , второй смещен относительно первого на расстояние  $l_{12}$  по оси X и имеет координаты  $(x_i + l_{12}, y_i, z_i)$ . Таким образом, оба отражателя находятся в пределах рассматриваемой строки РЛИ (аналогично рис. 2). Известны доплеровские смещения  $\omega_{D1}$  и  $\omega_{D2}$  частот эхо-сигналов от отражателей и углы их наблюдения  $\zeta_1$  и  $\zeta_2$ . Разность доплеровских частот сигналов от отражателей:

$$\Delta\omega_{12} = \omega_{D1} - \omega_{D2} = \frac{2\omega_0}{c} |\vec{V}| \cdot (\cos \zeta_1 - \cos \zeta_2).$$

Поскольку азимутальная координата в режиме ДОЛ определяется частотой сигнала и сдвиг по азимутальной оси РЛИ линейно зависит от частоты, должна быть справедлива пропорция:

$$\frac{\Delta\omega_{12}}{l_{12}} = \frac{\Delta\omega_D}{\Delta l_i};$$

$$\Delta l_i = \left| \frac{l_{12}}{\Delta\omega_{12}} \right| \cdot \Delta\omega_D. \quad (13)$$

Согласно (13) для отражателя (50;50) величина смещения не должна превышать  $\Delta l_i = 3.95$  м. На РЛИ максимум отметки сместился по азимутальной координате на 3 отсчета вправо, что соответствует 3 м. Таким образом, смещение не превышает рассчитанного значения  $\Delta l_i$ .

Теперь рассмотрим смещение отражателя (50;50) по дальности. Исходя из (7) значение  $\Delta\Delta r_i = -1.86$  м. На РЛИ максимум отметки сместился на 2 пикселя вверх (порядка 2-х метров).

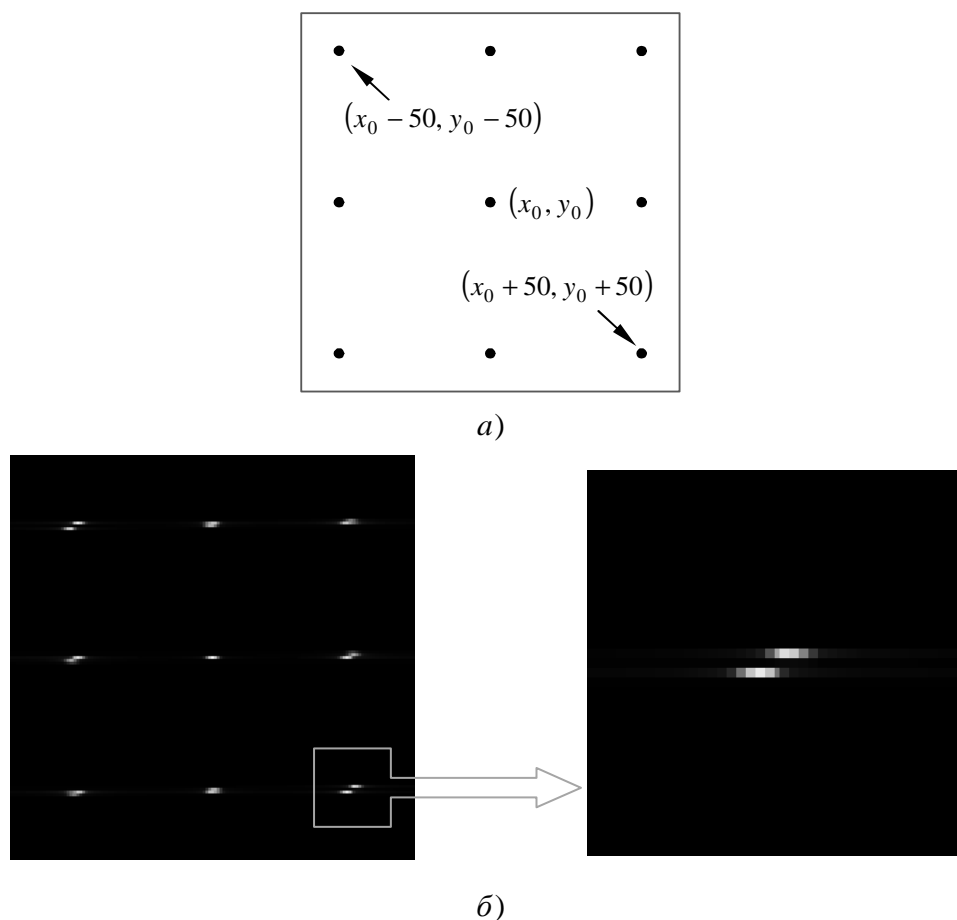


Рис. 3. (а) Схема расположения имитируемых отражателей; (б) наложенные друг на друга РЛИ: одно получено при движении носителя РСА по расчетной траектории, другое – при движении носителя по отличной от расчетной траектории. Вертикальная ось соответствует координате дальности (Y), горизонтальная – азимутальной координате (X))

Видно, что в результате неточности задания координат носителя РСА происходит переход и «размазывание» отметок по соседним элементам разрешения. Результаты математического моделирования соответствуют полученным теоретическим оценкам. Согласно рассмотренному примеру, при задании координат носителя РСА с погрешностью в 1 км отметка на РЛИ смещается на единицы метров.

Если величина смещения имитируемого отражателя не будет превышать половины элемента разрешения РСА, его отметка на РЛИ будет сохранять своё положение. Исходя из этого условия должны выбираться границы объема

пространства, при нахождении носителя РСА в пределах которых можно использовать один рассчитанный заранее сигнал.

## **Заключение**

В результате работы получены соотношения для оценки величин отклонения разности расстояний  $\Delta\Delta r_i$  и смещения  $\Delta l_i$ . Значения  $\Delta\Delta r_i$  и  $\Delta l_i$  определяют отклонение имитируемого точечного отражателя от задаваемых координат по наклонной и путевой дальности соответственно.

Можно сказать, что подготавливаемый заранее сигнал обладает определенной устойчивостью к неточности задания траектории носителя РСА.

Полученные соотношения позволяют определить допустимые отклонения координат, задаваемых при формировании сигнала, от моделируемых координат носителя РСА. При этом ошибки по положению объектов на имитируемом РЛИ не будут превышать полученных оценок.

Таким образом, показано, что

1. Есть возможность подготовить заранее сигнал и использовать его для преобразования в РМВ при формировании имитируемого сигнала.
2. Эти результаты позволяют разбить траекторию полета носителя на  $N$  участков и рассчитать заранее  $N$  массивов отсчетов сигнала.
3. В результате, из расчетов в РМВ исключается ресурсоемкая доля вычислений (расчет законов изменения фаз и задержек парциальных сигналов в составе имитируемого эхо-сигнала, а также выполнение расчета (1)).

## **Литература**

1. В.Н. Антипов, В.Т. Горяинов, А.Н. Кулин и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны/ Под ред. В.Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988 – 304 с.

2. Киселев А.В. Экономичный алгоритм имитации эхо-сигналов от распределенных пассивных помех. // Радиоэлектроника. - 1997.-N5. (Изв. высш. учеб. заведений).
3. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли/ Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368 с.