УДК 621.396.96

ОЦЕНКА ИСКАЖЕНИЙ ОТКЛИКА ПРИЕМНИКА РЛС НА СИГНАЛ, ФОРМИРУЕМЫЙ С ПОМОЩЬЮ ДВУХТОЧЕЧНОЙ МОДЕЛИ

Р. Ю. Белоруцкий

Новосибирский государственный технический университет

Получена 16 января 2012 г.

Аннотация. Рассмотрено формирование эхосигнала от точечного отражателя с помощью двухточечной модели. Получены аналитические соотношения для оценки искажений отклика приемника РЛС на формируемый сигнал.

Ключевые слова: имитационное моделирование эхосигналов, двухточечная модель, радиолокация.

Abstract. Forming echo signal reflected from the point reflector using the two-point model is considered. The analytical expressions for estimating distortions of radar receiving set response to the formed signal are obtained.

Keywords: radar echo simulation modeling, two-point model, radiolocation.

Введение

Известным способом тестирования радиолокационных станций является проведение полунатурных экспериментов с использованием специальных технических средств – имитаторов эхосигналов [1]. При этом в испытательных лабораториях моделируется полет носителя РЛС, а на вход приемника станции подаются эхосигналы, сформированные имитатором.

Имитация эхосигналов радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны (РСА) предполагает моделирование сигнала, отражаемого от поверхности Земли. Для этого зондируемый участок поверхности представляется набором из эквивалентных точечных отражателей, разбивается на полоски равных дальностей, и для каждой полоски производится расчет суммарного эхосигнала от отражателей, попадающих в её пределы. Имитируемый эхосигнал является совокупностью сигналов от всех полосок.

При движении носителя РЛС происходит изменение ракурса наблюдения участка поверхности, которое влечет за собой изменение положения полосок равных дальностей. В результате происходит перераспределение эквивалентных отражателей между ними. Вследствие того, что значения задержек элементов дальности имитатора принимают дискретные значения, возникает частная проблема, состоящая в необходимости обеспечения плавного перехода имитируемого отражателя между двумя соседними полосками. При этом должно обеспечиваться требуемое положение отражателя по наклонной и путевой дальностям. В то же время, разделение сигнала на элементы дальности необходимо, т.к. диктуется экономией вычислительных ресурсов, используемых для его формирования в режиме реального времени [2]. Выходом из ситуации является применение двухточечной модели с зависимыми отражателями [3].

Рассмотрим задачу обеспечения необходимого положения отражателя, когда он заменяется эквивалентным центром излучения (ЭЦИ) системы из двух зависимых неразрешаемых отражателей. Положение по наклонной дальности определяется временем задержки эхосигнала. В данном случае отражателям двухточечной модели соответствуют сигналы с фиксированными задержками, относящиеся к соседним элементам дальности имитатора. Они имеют ту же форму, что и имитируемый сигнал, отличаясь амплитудами. Значения амплитуд связаны и определяются координатой ЭЦИ [3]:

$$\tau_{зi} = \frac{1}{A_i}\left(A_{i1} \cdot \tau_{зi1} + A_{i2} \cdot \tau_{зi2}\right), \tag{1}$$

где A_{i1}, A_{i2} и $\tau_{зi1}$, $\tau_{зi2}$ – амплитуды и задержки сигналов от отражателей двухточечной модели ($\tau_{зi2} > \tau_{зi1}$); A_i, $\tau_{зi}$ – амплитуда и задержка (координата ЭЦИ) сигнала от имитируемого отражателя; $\tau_{зi} \in \left[\tau_{зi1}; \tau_{зi2}\right]$.

При условии неизменности мощности сигнала должно выполняться условие:

$$A_{i1} + A_{i2} = A_i\,. \tag{2}$$

Согласно (1), (2) амплитуды сигналов от отражателей модели рассчитываются как:

$$\begin{cases} A_{i1} = \dfrac{A_i\left(\tau_{зi} - \tau_{зi2}\right)}{\left(\tau_{зi1} - \tau_{зi2}\right)}; \\ A_{i2} = A_i - A_{i1}. \end{cases} \tag{3}$$

Положение точечного отражателя по путевой дальности в режиме синтезирования апертуры определяется законом изменения фазы эхосигнала. Необходимо, чтобы фаза сигнала от двухточечной модели соответствовала фазе имитируемого сигнала. Очевидно, что сигналы от соседних элементов дальности в точке приема будут иметь разные фазы, определяемые задержками:

$$\psi_{i1} = \omega_0 \cdot \tau_{зi1}, \quad \psi_{i2} = \omega_0 \cdot \tau_{зi2},$$

где ω_0 – частота зондирующего сигнала; ψ_{i1} и ψ_{i2} – фазовые набеги пропорциональные задержкам $\tau_{зi1}$ и $\tau_{зi2}$ сигналов от отражателей двухточечной модели.

Для достижения требуемого результирующего значения фазы сигнала от модели необходимо корректировать фазы сигналов от обоих отражателей на значения $\Delta\psi_{i1}$ и $\Delta\psi_{i2}$, чтобы в точке приема

$$\psi_{i1} + \Delta\psi_{i1} = \psi_{i2} + \Delta\psi_{i2} = \psi_i\,, \tag{4}$$

где ψ_i – фаза сигнала от имитируемого отражателя.

Постановка задачи

Рассмотрим форму отклика приемника РЛС на сигнал, формируемый с помощью двухточечной модели. Отклик линейного тракта приемника является суммой откликов на сигналы от отражателей модели:

$$g(\tau) = A_{i1} \cdot g_0\left(\tau - \tau_{зi1}\right) + A_{i2} \cdot g_0\left(\tau - \tau_{зi2}\right). \tag{5}$$

В качестве эталонной формы отклика на сигнал, отраженный от одиночного отражателя, будем рассматривать треугольную, имеющую место при согласованной обработке простого импульсного зондирующего сигнала единичной амплитуды:

$$g_0(\tau) = \begin{cases} \tau_u(1+\tau/\tau_u), & -\tau_u \le \tau < 0 \\ \tau_u(1-\tau/\tau_u), & 0 \le \tau < \tau_u \\ 0, & \tau < -\tau_u,\ \tau > \tau_u \end{cases} \tag{6}$$

где τ_u – длительность импульса.

Согласно условию неразрешимости отражателей:

$$\Delta\tau \le \tau_u, \tag{7}$$

где $\Delta\tau = \tau_{зi2} - \tau_{зi1}$ – размер модели.

Согласно (5), (6), (7) отклик на сигнал от двухточечной модели:

$$g(\tau) = \begin{cases} A_{i1}\tau_u\left(1+\dfrac{\tau-\tau_{зi1}}{\tau_u}\right), & \tau_{зi1}-\tau_u \le \tau < \tau_{зi2}-\tau_u \\ A_{i1}\tau_u\left(1+\dfrac{\tau-\tau_{зi1}}{\tau_u}\right) + A_{i2}\tau_u\left(1+\dfrac{\tau-\tau_{зi2}}{\tau_u}\right), & \tau_{зi2}-\tau_u \le \tau < \tau_{зi1} \\ A_{i1}\tau_u\left(1-\dfrac{\tau-\tau_{зi1}}{\tau_u}\right) + A_{i2}\tau_u\left(1+\dfrac{\tau-\tau_{зi2}}{\tau_u}\right), & \tau_{зi1} \le \tau < \tau_{зi2} \\ A_{i1}\tau_u\left(1-\dfrac{\tau-\tau_{зi1}}{\tau_u}\right) + A_{i2}\tau_u\left(1-\dfrac{\tau-\tau_{зi2}}{\tau_u}\right), & \tau_{зi2} \le \tau < \tau_{зi1}+\tau_u \\ A_{i2}\tau_u\left(1-\dfrac{\tau-\tau_{зi2}}{\tau_u}\right), & \tau_{зi1}+\tau_u \le \tau \le \tau_{зi2}+\tau_u \\ 0, & \tau < \tau_{зi1}-\tau_u,\ \tau > \tau_{зi2}+\tau_u \end{cases} \tag{8}$$

Таким образом, огибающая $g(\tau)$ описывается кусочно-линейной функцией (рис. 1) на пяти интервалах:

$$[\tau_{зi1}-\tau_u;\tau_{зi2}-\tau_u],\ [\tau_{зi2}-\tau_u;\tau_{зi1}],\ [\tau_{зi1};\tau_{зi2}],\ [\tau_{зi2};\tau_{зi1}+\tau_u],\ [\tau_{зi1}+\tau_u;\tau_{зi2}+\tau_u]. \tag{9}$$

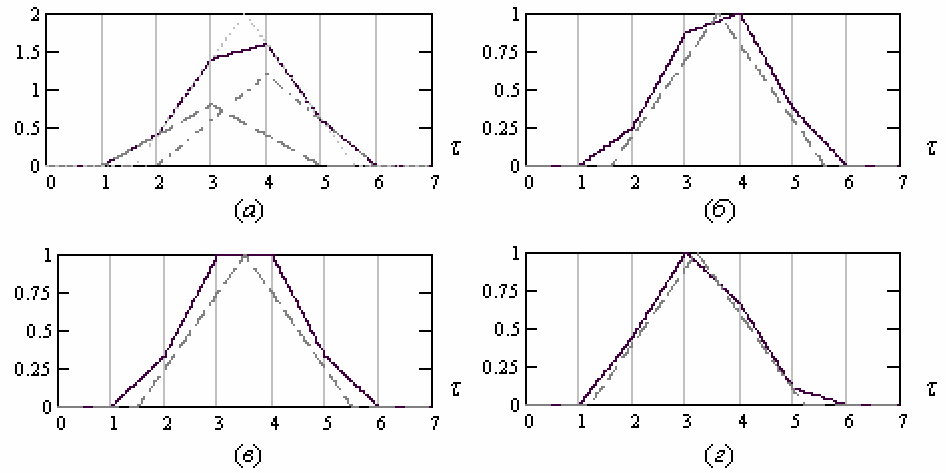

Рис. 1. Искаженный, эталонный, а также отдельные отклики на сигналы от отражателей модели при $\tau_{зi} = 3.6$ (а); нормированные искаженный и эталонный отклики при $\tau_{зi} = 3.6$ (б), при $\tau_{зi} = 3.5$ (в), при $\tau_{зi} = 3.2$ (г) ($\tau_{зi1} = 3$, $\tau_{зi2} = 4$, $\tau_и = 2$).

Видно, что форма $g(\tau)$ отличается от эталонной треугольной. Степень искажения отклика зависит от координаты ЭЦИ и отношения размера модели к длительности импульса $\Delta\tau/\tau_и = d$. Для адекватного моделирования необходимо знать влияние этих параметров на форму отклика.

Цель работы

Оценить искажения отклика РЛС при формировании имитируемого эхосигнала с помощью двухточечной модели.

Решение

Оценим искажения отклика по следующим критериям: уменьшению максимального значения, смещению максимума, изменению ширины, смещению центра тяжести и середины сечения.

1. *Уменьшение максимального значения* $g(\tau)$ по сравнению с эталонным откликом $A_i g_0(\tau)$ можно оценить как отношение максимума искаженного отклика к максимуму эталонного. Обозначим это отношение коэффициентом:

$$k_{g\,\text{макс.}} = \begin{cases} 1 - A_{i2}\Delta\tau/(A_i\tau_u), & A_{i1} \geq A_{i2} \\ 1 - A_{i1}\Delta\tau/(A_i\tau_u), & A_{i2} > A_{i1} \end{cases} \qquad (10)$$

Например, для искаженного отклика, изображенного на рис. 1а, $k_{g\,\text{макс.}} = 0.8$. На рис. 2а приведены примеры зависимостей коэффициента $k_{g\,\text{макс.}}$ от положения ЭЦИ, задаваемого соотношением (1). Зависимости получены для значений $d = 0.1, 0.2, \ldots 1$.

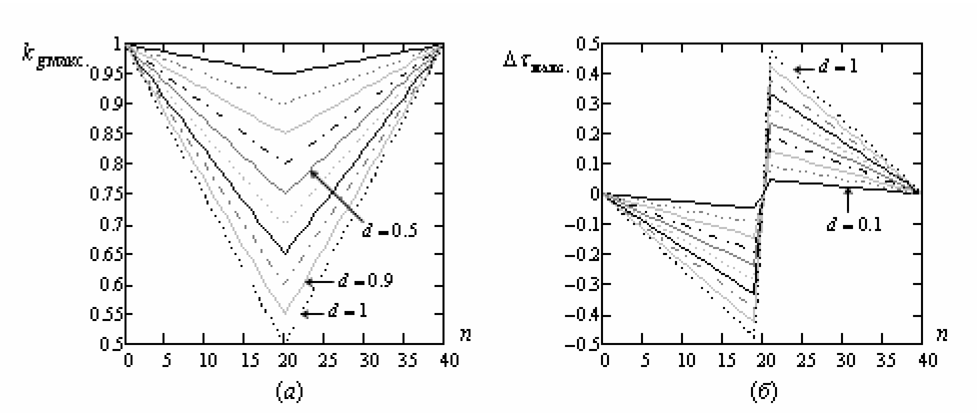

Рис. 2. Графики зависимости коэффициента уменьшения максимального значения $k_{g\,\text{макс.}}$ (а) и смещения максимума $\Delta\tau_{\text{макс.}}$ (б) отклика от положения ЭЦИ

(значение $\Delta\tau_{\text{макс.}}$ нормировано к длительности импульса τ_u).

Здесь n – номер шага изменения временной координаты ЭЦИ ($\tau_{зi}$) от значения $\tau_{зi1}$ к $\tau_{зi2}$. Шаг составляет $\Delta\tau/40$: $\tau_{зi} = \tau_{зi1}, (\tau_{зi1} + \Delta\tau/40), \ldots \tau_{зi2}$.

2. *Смещение максимума отклика относительно задаваемого ЭЦИ.*

Максимальное значение $g(\tau)$ всегда приходится на координату отражателя с наибольшей амплитудой: $\tau_{g\,\text{макс.}} = \tau_{зi1}$, если $A_{i1} > A_{i2}$ и $\tau_{g\,\text{макс.}} = \tau_{зi2}$, если $A_{i2} > A_{i1}$. Поэтому смещение максимума $\Delta\tau_{\text{макс.}} = \tau_{g\,\text{макс.}} - \tau_{зi}$ находится как разность координат ЭЦИ и ближайшего к нему отражателя модели:

$$\Delta\tau_{\text{макс.}} = \begin{cases} \tau_{зi1} - \tau_{зi}, & A_{i1} > A_{i2} \\ \tau_{зi2} - \tau_{зi}, & A_{i2} > A_{i1} \end{cases}$$

Например, для рис. 1а $\Delta\tau_{\text{макс.}} = 0.4$. В случае $A_{i1} = A_{i2}$ ЭЦИ находится в середине промежутка между отражателями, при этом форма отклика имеет симметричный вид, а вершина – плоскую форму (рис. 1в). На рис. 2б изображена зависимость $\Delta\tau_{\text{макс.}}$ от положения ЭЦИ.

3. *Изменение ширины отклика.*

Получим выражение для определения ширины сечения нормированного искаженного отклика по уровню $l_g < 1$. Очевидно, что она должна находиться как

$$\Delta\tau_{l_g} = \tau_2 - \tau_1, \tag{11}$$

где τ_1 и τ_2 – координаты границ сечения отклика соответственно по левую и правую сторону относительно вершины.

Для нахождения τ_1 и τ_2 необходимо решить уравнение:

$$g(\tau) = l_g. \tag{12}$$

Так как огибающая отклика $g(\tau)$ описывается разными выражениями на пяти интервалах (9), перед решением (12) необходимо установить, в какие из них попадают границы сечения отклика. Далее в соответствии с интервалами выбираем пару выражений $g(\tau)$ и дважды решаем (12), находя τ_1 и τ_2. Для нахождения ширины сечения по произвольному уровню l_g необходимо определить все возможные комбинации пар уравнений (12). Несложно показать, что существует 4 варианта формы искаженного отклика $g(\tau)$: по два для каждого положения вершины (рис. 3). Варианты отличаются друг от друга взаимным положением точек излома огибающей.

В случае $A_{i1} > A_{i2}$ форма отклика, соответствующая варианту №1 (рис. 3а), наблюдается, когда

$$A_{i1}(2\Delta\tau/\tau_u - 1) < A_{i2}, \tag{13}$$

а варианту №2 (рис. 3б) – когда

$$A_{i1}(2\Delta\tau/\tau_u - 1) \geq A_{i2}. \tag{14}$$

Для случая $A_{i2} > A_{i1}$ вариант №1 (рис. 3в) имеет место при условии

$$A_{i1} \geq A_{i2}\left(2\Delta\tau/\tau_u - 1\right), \tag{15}$$

а №2 (рис. 3г) – при условии

$$A_{i1} < A_{i2}\left(2\Delta\tau/\tau_u - 1\right). \tag{16}$$

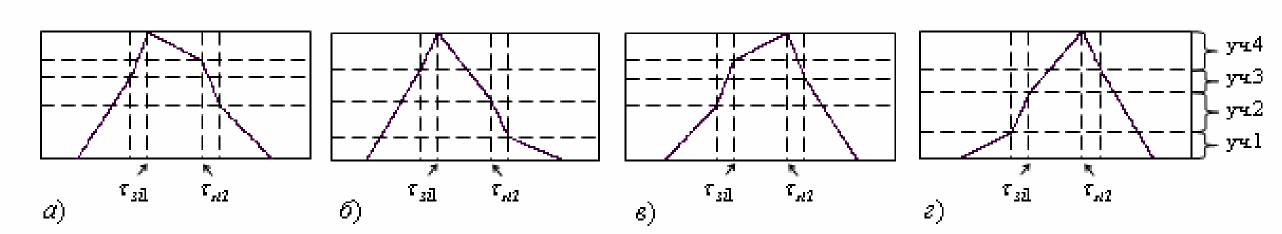

Рис. 3. Варианты формы отклика при $A_{i1} > A_{i2}$: №1 – (а), №2 – (б);

при $A_{i2} > A_{i1}$: №1 – (в), №2 – (г).

В свою очередь, огибающую отклика в случае каждого из четырех вариантов можно разделить на четыре участка по уровню l_g (рис. 3: нумерация установлена снизу вверх). При этом каждому из них будет соответствовать своя пара уравнений (12).

Для того чтобы определить, какому участку принадлежит уровень сечения l_g, необходимо проверить последовательно следующие неравенства.

I. При $A_{i1} \geq A_{i2}$

Участок 1:

$$l_g \leq \Delta\tau/\left(\tau_u\left(1 + A_{i1}/A_{i2}\right) - \Delta\tau\right). \tag{17}$$

Если при обозначении участка используется две цифры, то первая указывает его номер, вторая – номер варианта формы отклика.

Участок 2.1 (при выполнении условия (13)):

$$\Delta\tau/\left(\tau_u\left(1 + A_{i1}/A_{i2}\right) - \Delta\tau\right) < l_g \leq \Delta\tau/\left(\tau_u\left(1 + \left(1 - \Delta\tau/\tau_u\right)A_{i2}/A_{i1}\right)\right). \tag{18}$$

Участок 2.2 (при выполнении условия (14)):

$$\Delta\tau/\left(\tau_u\left(1 + A_{i1}/A_{i2}\right) - \Delta\tau\right) < l_g \leq \left(A_{i2} + A_{i1}\left(1 - \Delta\tau/\tau_u\right)\right)/\left(A_{i1} + A_{i2}\left(1 - \Delta\tau/\tau_u\right)\right). \tag{19}$$

Участок 3.1 (при выполнении (13)):

$$\Delta\tau/\left(\tau_u\left(1+\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)A_{i2}/A_{i1}\right)\right)<l_g\le\left(A_{i2}+A_{i1}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)/\left(A_{i1}+A_{i2}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right). \tag{20}$$

Участок 3.2 (при выполнении (14)):

$$\left(A_{i2}+A_{i1}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)/\left(A_{i1}+A_{i2}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)<l_g\le\Delta\tau/\left(\tau_u\left(1+\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)A_{i2}/A_{i1}\right)\right). \tag{21}$$

Участок 4.1 (при выполнении (13)):

$$\left(A_{i2}+A_{i1}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)/\left(A_{i1}+A_{i2}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)<l_g\le 1. \tag{22}$$

Участок 4.2 (при выполнении (14)):

$$\Delta\tau/\left(\tau_u\left(1+\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)A_{i2}/A_{i1}\right)\right)<l_g\le 1. \tag{23}$$

II. При $A_{i2}>A_{i1}$

Участок 1:

$$l_g\le\Delta\tau/\left(\tau_u\left(A_{i2}/A_{i1}+1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right). \tag{24}$$

Участок 2.1 (при выполнении (15)):

$$\Delta\tau/\left(\tau_u\left(A_{i2}/A_{i1}+1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)<l_g\le\Delta\tau/\left(\tau_u\left(1+\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)A_{i1}/A_{i2}\right)\right). \tag{25}$$

Участок 2.2 (при выполнении (16)):

$$\Delta\tau/\left(\tau_u\left(A_{i2}/A_{i1}+1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)<l_g\le\left(A_{i1}+A_{i2}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)/\left(A_{i2}+A_{i1}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right). \tag{26}$$

Участок 3.1 (при выполнении (15)):

$$\Delta\tau/\left(\tau_u\left(1+\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)A_{i1}/A_{i2}\right)\right)<l_g\le\left(A_{i1}+A_{i2}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)/\left(A_{i2}+A_{i1}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right). \tag{27}$$

Участок 3.2 (при выполнении (16)):

$$\left(A_{i1}+A_{i2}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)/\left(A_{i2}+A_{i1}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)<l_g\le\Delta\tau/\left(\tau_u\left(1+\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)A_{i1}/A_{i2}\right)\right). \tag{28}$$

Участок 4.1 (при выполнении (15)):

$$\left(A_{i1}+A_{i2}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)/\left(A_{i2}+A_{i1}\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)\right)<l_g\le 1. \tag{29}$$

Участок 4.2 (при выполнении (16)):

$$\Delta\tau/\left(\tau_u\left(1+\left(1-\Delta\tau/\tau_u\right)A_{i1}/A_{i2}\right)\right)< l_g \le 1. \tag{30}$$

После решения уравнений (12), соответствующих условиям (17)-(30), исходя из (11) получена система выражений для определения ширины сечения *нормированного* искаженного отклика:

$$\Delta\tau_{l_g} = $$

$$=\begin{cases} \Delta\tau+2\tau_u-\left(\frac{1}{A_{i2}}+\frac{1}{A_{i1}}\right)\left(A_{i1,2}+A_{i2,1}\left(1-\frac{\Delta\tau}{\tau_u}\right)\right)l_g\tau_u, & (\text{уч.}1) \\ 2\tau_u\mp\tau_{зi1,2}\pm\frac{A_{i1}\tau_{зi1}+A_{i2}\tau_{зi2}}{A_{i1}+A_{i2}}-\left(\frac{1}{A_{i1}+A_{i2}}+\frac{1}{A_{i1,2}}\right)\left(A_{i1,2}+A_{i2,1}\left(1-\frac{\Delta\tau}{\tau_u}\right)\right)l_g\tau_u, & (\text{уч. } 2.1 \text{ и } 2.2) \\ 2\tau_u\left[1-l_g+l_g\Delta\tau\Big/\left(\left(1+A_{i1,2}\big/A_{i2,1}\right)\tau_u\right)\right], & (\text{уч. } 3.1) \\ 2\left(1-l_g\right)\left(\tau_u\Big/\left(1-\frac{A_{i2,1}}{A_{i1,2}}\right)\pm\Delta\tau\Big/\left(\frac{A_{i2}}{A_{i1}}-\frac{A_{i1}}{A_{i2}}\right)\right), & (\text{уч. } 4.1 \text{ и } 4.2) \\ \tau_u\mp\tau_{зi1,2}\mp\frac{A_{i1}\left(\tau_u+\tau_{зi1}\right)+A_{i2}\left(\tau_u-\tau_{зi2}\right)}{A_{i2}-A_{i1}}\pm\left(\frac{1}{A_{i2}-A_{i1}}\mp\frac{1}{A_{i1,2}}\right)\left(A_{i1,2}+A_{i2,1}\left(1-\frac{\Delta\tau}{\tau_u}\right)\right)l_g\tau_u, & (\text{уч. } 3.2) \end{cases}$$

(31)

где при обозначении $A_{i1,2}$, $A_{i2,1}$, $\tau_{зi1,2}$, $\tau_{зi2,1}$ и «$\pm$», «$\mp$» первая цифра индекса и верхний знак относятся к случаю $A_{i1} \ge A_{i2}$, вторая цифра и нижний знак – к $A_{i2} > A_{i1}$. Перед использованием (31), опираясь на условия (13)-(30), необходимо определить, какому участку принадлежит l_g, и выбрать соответствующее выражение для расчета $\Delta\tau_{l_g}$.

Ширина сечения нормированного эталонного (треугольного) отклика определяется как

$$\Delta\tau_{l_g эт.} = 2\tau_u\left(1-l_g\right). \tag{32}$$

Рассмотрим графики, построенные на основе (31). На рис. 4 приведены примеры зависимостей нормированной ширины сечения искаженного отклика от положения ЭЦИ, задаваемого соотношением (1). Зависимости получены для $d = 0.1, 0.2, \ldots 1$. Нормирование произведено к значению ширины эталонного отклика (32). Семейство зависимостей для сечения по уровню $l_g = 0.707$ представлено на рис. 4а, для $l_g = 0.5$ – на рис. 4б, для $l_g = 0.1$ – на рис. 4г.

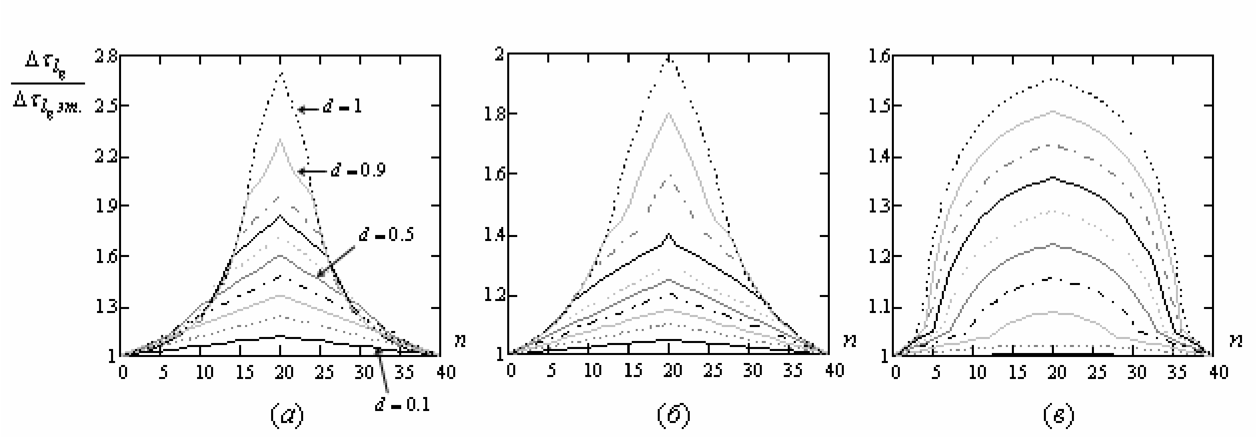

Рис. 4. Графики зависимостей нормированной ширины искаженного отклика от положения ЭЦИ.

При $n = 0$ координата ЭЦИ совпадает со значением задержки сигнала от первого отражателя ($\tau_{зi} = \tau_{зi1}$), а при $n = 40$ – от второго ($\tau_{зi} = \tau_{зi2}$). В этих случаях сигнал от двухточечной модели идентичен имитируемому сигналу, а форма отклика – эталонной, соответственно $\Delta\tau_{l_g} = \Delta\tau_{l_g эт.}$. Когда $n = 20$, ЭЦИ находится в середине промежутка между отражателями, при этом наблюдается наибольшее расширение отклика относительно эталонного. Видно, что расширение растет вместе со значением d и по мере приближения ЭЦИ к середине интервала между отражателями модели.

4. *Смещение центра тяжести отклика.*

Известно, что в РЛС с автоматическим измерением дальности задержка эхосигнала может определяться по положению центра тяжести (ЦТ) отклика [4]. Используем этот параметр в качестве критерия оценки искажений отклика.

Координата ЦТ $\tau_{цт}$ отклика определяется через решение интегрального уравнения:

$$\int_{-\infty}^{\tau_{цт}} g(\tau) d\tau = \int_{\tau_{цт}}^{\infty} g(\tau) d\tau . \qquad (33)$$

Для решения (33) представим интегралы в виде сумм отдельных интегралов на интервалах (9). Так как отдельные отклики на сигналы от отражателей модели являются симметричными фигурами, координата центра тяжести $g(\tau)$ будет находиться в интервале $[\tau_{зi1};\tau_{зi2}]$, разбивая его на отрезки $[\tau_{зi1};\tau_{цт}]$ и $[\tau_{цт};\tau_{зi2}]$. Интегралы, вычисленные на этих отрезках, будут относиться к левой и правой частям уравнения (33) соответственно:

$$\int_{\tau_{зi1}-\tau_и}^{\tau_{зi2}-\tau_и} g(\tau)d\tau + \int_{\tau_{зi2}-\tau_и}^{\tau_{зi1}} g(\tau)d\tau + \int_{\tau_{зi1}}^{\tau_{цт}} g(\tau)d\tau = \int_{\tau_{цт}}^{\tau_{зi2}} g(\tau)d\tau + \int_{\tau_{зi2}}^{\tau_{зi1}+\tau_и} g(\tau)d\tau + \int_{\tau_{зi1}+\tau_и}^{\tau_{зi2}+\tau_и} g(\tau)d\tau . \quad (34)$$

После преобразований (34) сводится к:

$$a\tau_{цт}^{\ 2} + b\tau_{цт} + c = 0, \quad (35)$$

где $a = -(A_{i1} - A_{i2})/\tau_и$;

$b = 2(A_{i1}(1+\tau_{зi1}/\tau_и) + A_{i2}(1-\tau_{зi2}/\tau_и))$;

$c = A_{i2}\tau_{зi2}(\tau_{зi2}/\tau_и - 2) - A_{i1}\tau_{зi1}(2+\tau_{зi1}/\tau_и)$.

Из двух корней (35) выбирается тот, который удовлетворяет условию $\tau_{цт} \in [\tau_{зi1};\tau_{зi2}]$. В случае, если $A_{i1} = A_{i2}$, центр тяжести совпадает с ЭЦИ, тогда $\tau_{цт} = \tau_{зi} = \tau_{зi1} + \Delta\tau/2$.

Зная координату ЦТ, несложно определить её отклонение относительно ЭЦИ:

$$\Delta\tau_{цт} = \tau_{цт} - \tau_{зi}.$$

На рис. 5в приведены графики зависимости $\Delta\tau_{цт}$ от координаты ЭЦИ для разных значений d. Видно, что величина $\Delta\tau_{цт}$ растет вместе с d.

5. *Отклонение середины сечения отклика от задаваемого ЭЦИ.*

Известно, что при визуальной оценке человек-оператор определяет положение отметки на РЛИ по положению её середины [5]. Используем в качестве ещё одного критерия оценки искажений положение середины сечения отклика.

Середина сечения эталонного отклика совпадает с координатами вершины и центра тяжести ввиду симметрии его фигуры. Очевидно, что искаженный отклик не обладает таким свойством. Положение середины сечения по уровню l_g можно найти как

$$\tau_{cc} = (\tau_2 + \tau_1)/2 . \qquad (36)$$

На основе подхода, описанного в п. 3, исходя из (36) получена система выражений для определения координаты середины сечения *нормированного* искаженного отклика:

$$\tau_{cc} =$$
$$= \begin{cases} \dfrac{\tau_{зi2} + \tau_{зi1}}{2} \pm \dfrac{l_g \tau_u}{2} \left(\dfrac{A_{i2,1}}{A_{i1,2}} - 1 \right) \left(1 + \dfrac{A_{i1,2}}{A_{i2,1}} - \dfrac{\Delta\tau}{\tau_u} \right), & (\text{уч. } 1) \\ \dfrac{1}{2} \left(\tau_{зi1,2} + \dfrac{A_{i1}\tau_{зi1} + A_{i2}\tau_{зi2}}{A_{i1} + A_{i2}} \pm l_g \tau_u \dfrac{A_{i2,1}}{A_{i1,2}} \left(1 - \dfrac{\Delta\tau}{\tau_u} \left(\dfrac{A_{i2,1}}{A_{i1} + A_{i2}} \right) \right) \right), & (\text{уч. } 2.1, 2.2) \\ (A_{i1}\tau_{зi1} + A_{i2}\tau_{зi2}) / (A_{i1} + A_{i2}), & (\text{уч. } 3.1) \\ \pm \left[(l_g - 1) \left(\left(1 + \dfrac{A_{i1,2}}{A_{i2,1}} \right) \tau_u \mp \tau_{зi2,1} \right) \pm \tau_{зi1,2} \left(l_g - \dfrac{{A_{i1,2}}^2}{{A_{i2,1}}^2} \right) \right] \Bigg/ \left(1 - \dfrac{{A_{i1,2}}^2}{{A_{i2,1}}^2} \right), & (\text{уч. } 4.1, 4.2) \\ \pm \left[\tau_u (l_g - 1) + \tau_{зi1,2} \left(\pm \dfrac{A_{i2,1}}{A_{i1,2}} l_g \mp 2 \dfrac{A_{i1,2}}{A_{i2,1}} \pm 1 \right) \pm (\tau_{зi2,1} \mp \tau_u) \left(1 - \dfrac{A_{i2,1}}{A_{i1,2}} l_g \right) \right] \Bigg/ 2 \left(1 - \dfrac{A_{i1,2}}{A_{i2,1}} \right), & (\text{уч. } 3.2) \end{cases}$$

$$(37)$$

где при обозначении $A_{i1,2}$, $A_{i2,1}$, $\tau_{зi1,2}$, $\tau_{зi2,1}$ и «$\pm$», «$\mp$» первая цифра индекса и верхний знак относятся к случаю $A_{i1} \geq A_{i2}$, вторая цифра и нижний знак – к $A_{i2} > A_{i1}$. Перед использованием (37), опираясь на (13)-(30), необходимо определить, какому участку принадлежит l_g и выбрать соответствующее выражение для расчета τ_{cc}.

Отклонение середины сечения отклика от координаты ЭЦИ найдем как:

$$\Delta\tau_{cc} = \tau_{cc} - \tau_{зi} .$$

На рис. 5 изображены примеры графиков $\Delta\tau_{cc}$ как функции от координаты ЭЦИ: для сечения по уровню $l_g = 0.707$ (а) и $l_g = 0.5$ (б).

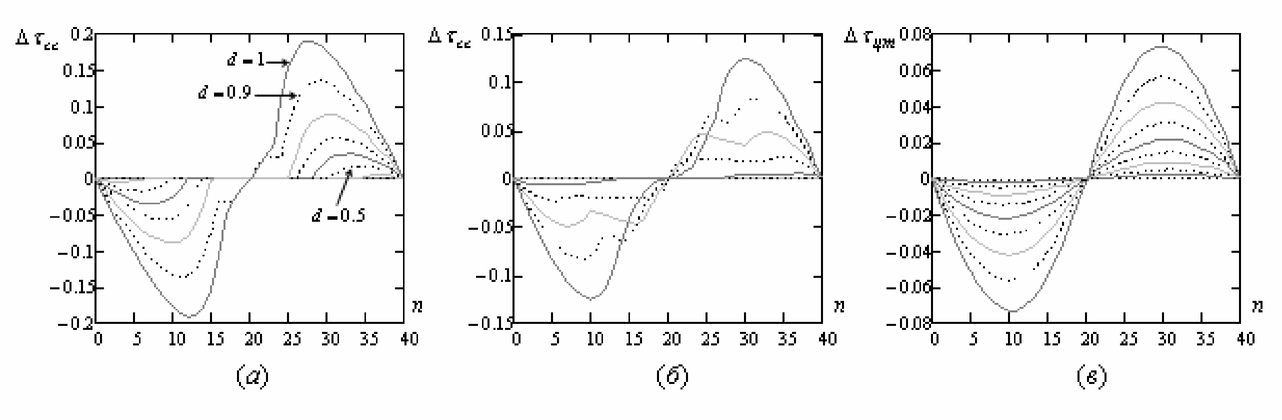

Рис. 5. Графики отклонения середины сечения (а), (б) и центра тяжести отклика от ЭЦИ (в) как функций от координаты ЭЦИ (величина отклонений нормирована к длительности импульса τ_u).

Видно, что величина отклонений также увеличивается вместе с d. Координата середины сечения совпадает с ЭЦИ ($\Delta\tau_{cc} = 0$) в случае симметрии отклика (при $n = 0, 20, 40$).

Выводы

Применение двухточечной модели приводит к искажениям отклика приемника РЛС, заключающимся в уменьшении максимального значения, изменении ширины, смещении центра тяжести и середины сечения отклика относительно задаваемого положения ЭЦИ.

Получены аналитические соотношения для оценки искажений отклика по данным критериям.

Настоящие соотношения позволят определить допустимое значение отношения $\Delta\tau/\tau_u$, при котором искажения отклика РЛС не будут выходить за заданные пределы. Этим будет обеспечиваться адекватность моделирования эхо-сигнала при имитации.

Рассмотренный подход позволит формировать эхосигналы РСА при строчной структуре формируемого РЛИ и смене ракурса наблюдения зондируемого участка в процессе имитации.

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. Белоруцкий Р.Ю., Киселев А.В., Тырыкин С.В. Два алгоритма формирования эхо-сигналов от сложного радиолокационного объекта/ Материалы X международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск , 22-24 сентября, 2010 г. – Новосибирск , НГТУ, 2010 г., том 4, с. 29-32
3. Тырыкин С.В., Киселёв А.В. Ошибка оценки задержки эхосигнала от сложного радиолокационного объекта, моделируемого набором дискретных отражателей // Сборник научных трудов НГТУ, Новосибирск, НГТУ, 2001. – №4(26)., С. 63–68.
4. Жуковский А.П., Оноприенко Е.И., Чижов В.И. Теоретические основы радиовысотометрии. Под ред. А. П. Жуковского. – М.: Сов. радио, 1979. – 320 с.
5. Слуцкий В.З., Фогельсон Б.И. Импульсная техника и основы радиолокации. Изд. 3-е, переработ. и дополн. – М.: Воениздат, 1975. – 439 с.