

УДК 621.396.96

Методика оценивания качества формирования виртуальных объектов на радиолокационных изображениях

Гусев С.Н.*, Сахно И.В., Хуббиев Р.В.

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

**e-mail: gusev_sn@mail.ru*

Аннотация

Предложена методика, позволяющая рассчитать значения показателей качества имитации объектов на радиолокационных изображениях на основе корреляционного анализа и теории обнаружения. Представлены результаты полунатурного моделирования процесса формирования виртуальных объектов с использованием имитаторов тестовых сигналов радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны.

Ключевые слова: радиолокационная система с синтезированной апертурой антенны, радиолокационное изображение, имитация сигнала, траекторный сигнал.

Введение

Анализ текущего состояния и перспектив развития технологий обзора земной поверхности, показывает, что в настоящее время большое внимание уделяется созданию и совершенствованию радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны (РСА), обеспечивающих всепогодную круглосуточную съемку

земной поверхности с высоким разрешением. Тенденции развития РСА авиационного и космического базирования, в первую очередь, направлены на повышение информативности радиолокационных изображений (РЛИ) за счет совершенствования аппаратуры и методов цифровой обработки сигналов (ЦОС).

Одним из направлений повышения информативности РЛИ является улучшение радиометрических характеристик РСА (радиометрическая чувствительность, радиометрическая разрешающая способность), определяющих возможность и достоверность обнаружения слабо отражающих целей и различения объектов с близкими значениями удельной эффективной площади рассеяния (ЭПР). Это, в свою очередь, требует подтверждения достигнутых значений характеристик аппаратуры РСА, что осуществляется в процессе радиометрической калибровки радиолокационного тракта.

Перспективным и универсальным методом калибровки является использование имитаторов тестовых сигналов, представляющих собой активные ретрансляторы (транспондеры) и позволяющих формировать виртуальные объекты (ВО) на РЛИ [1-4]. Принцип формирования ВО на РЛИ заключается в создании на входе приемника РСА пакета ответных когерентных импульсов от точечных отражателей (ТО), расположенных в соответствии с заданной моделью имитируемого (калибровочного) объекта (ИО) [5-7]. Преимущество данного метода обусловлено тем, что, в отличие от методов, использующих типовые радиолокационные мишени, в т.ч. наборы уголкового отражателей, имитаторы сигналов позволяют формировать эхо-сигналы от сложных распределенных объектов, которые представляют наибольший интерес при исследовании эффективности алгоритмов ЦОС РСА. С другой стороны, высокая

разрешающая способность РСА определяет жесткие требования к имитируемым сигналам, а именно, к точности определения параметров траектории носителя РСА и характеристик аппаратуры, что, в свою очередь, влияет на качество формирования ВО на РЛИ.

Контроль качества формирования ВО на РЛИ остается малоизученным, так как единого методического подхода к оцениванию качества формирования тестовых сигналов РСА не существует.

В настоящее время оценка качества РЛИ осуществляется дешифровщиком либо методами инструментального анализа, основанными на визуальной оценке формы и измерении линейных размеров объектов, что не дает интегральной количественной оценки полученного изображения. Перспективным направлением в области оценивания качества формирования ВО является рассмотрение объектов на РЛИ с точки зрения описания семантических характеристик формируемых изображений [8]. Изложенные соображения определяют актуальность задачи разработки методического подхода к оцениванию подобия двух изображений аналогично психофизическому восприятию человека.

1. Методика оценивания качества формирования виртуальных объектов на радиолокационных изображениях

Предлагаемый подход к оцениванию качества формирования ВО основан на проведении анализа статистических характеристик [9, 10] исследуемых РЛИ. При такой постановке задачи реальный объект характеризуется некоторым множеством независимых параметров: значений координат точечных отражателей (элементов

сложной сосредоточенной цели) в плоскости «азимут – наклонная дальность» и амплитуд соответствующих отметок ТО на РЛИ. Таким образом, реальной цели на РЛИ соответствует набор признаков $S(i,j)$ и $I(i,j)$, где $S(i,j)$ – значение координат ij -ой отметки, $I(i,j)$ – интенсивность ij -ой отметки на РЛИ.

У реальных целей каждое из значений I на РЛИ является случайной величиной, так как представляет собой результат обработки траекторного сигнала цели, зависящий от множества различных факторов, таких как интерференция отраженных сигналов, интенсивность спекл-шума и особенностей построения системы ЦОС [11-13]. Значения S в рамках решаемой задачи являются не столь значимыми, так как не характеризуют расположение элементов объекта, в т.ч. ошибки позиционирования элементов сложной цели. В связи с этим далее рассматривается только матрица значений интенсивности $I(i,j)$ отметок на амплитудном РЛИ следующего вида:

$$I = \begin{bmatrix} I(1,1) & I(1,2) & \dots & I(1,N_y) \\ I(2,1) & I(2,2) & \dots & I(2,N_y) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ I(N_x,1) & I(N_x,2) & \dots & I(N_x,N_y) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где N_x, N_y – количество элементов РЛИ по координатам азимута и наклонной дальности соответственно.

Степень подобия виртуального и реального объектов на РЛИ, представленных в виде матриц значений интенсивности (1), может быть оценена путем сравнения указанных РЛИ с использованием следующих показателей [14, 15]:

1) Коэффициента корреляции эталонного и исследуемого РЛИ, рассчитываемого в соответствии с выражением:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [I_{\text{эт}}(i, j) - \bar{I}_{\text{эт}}(i, j)] [I_{\text{во}}(i, j) - \bar{I}_{\text{во}}(i, j)]}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [I_{\text{эт}}(i, j) - \bar{I}_{\text{эт}}(i, j)]^2 \right) \left(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [I_{\text{во}}(i, j) - \bar{I}_{\text{во}}(i, j)]^2 \right)}}, \quad (2)$$

где: $I_{\text{эт}}(i, j)$ – интенсивность отметки в точке с индексами (i, j) на эталонном РЛИ;

$I_{\text{во}}(i, j)$ – интенсивность отметки в точке с индексами (i, j) на виртуальном РЛИ;

$\bar{I}_{\text{во}}, \bar{I}_{\text{эт}}$ – статистически осредненные значения интенсивности [11].

2) Среднеквадратической ошибки (СКО) формирования ВО, рассчитываемой по формуле [15]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N_x N_y - 1} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} [I_{\text{эт}}(i, j) - I_{\text{во}}(i, j)]^2. \quad (3)$$

Приведенные выражения используются для локальных участков РЛИ, при этом значения N_x и N_y определяются границами оцениваемых объектов.

Расчет коэффициента корреляции и СКО производится для обнаружения ВО на РЛИ по критерию наибольшей степени подобия с имитируемым объектом, что недостаточно для принятия решения о качестве формирования ВО на РЛИ. Для этих целей в работе введен интегральный показатель – вероятность воспроизведения виртуального объекта $P_{\text{вво}}$, характеризующий вероятность достижения такой степени подобия ВО реальному, при которой их невозможно различить ($\sigma^2 \rightarrow 0$).

Правомерность данного подхода определяется тем, что траекторный сигнал цели, также как и имитирующий траекторный сигнал, является случайной

величиной с неизвестной фазой и амплитудой [11, 13]. Это в свою очередь дает право рассматривать РЛИ, являющееся результатом обработки траекторного сигнала, как массив случайных величин со своим законом распределения, зависящим от характеристик объекта наблюдения и характеристик фона местности.

Так как критерием качества формирования ВО на РЛИ является достижение максимального подобия виртуального и реального объектов, интерес в данном случае представляет расхождение значений интенсивности отметок на соответствующих РЛИ. Поэтому в качестве исследуемой будет выступать матрица значений разностного РЛИ, определяемого выражением:

$$I_{\text{раз}}(i, j) = \begin{bmatrix} |I_{\text{эт}}(1,1) - I_{\text{во}}(1,1)| & \dots & |I_{\text{эт}}(1, N_y) - I_{\text{во}}(1, N_y)| \\ |I_{\text{эт}}(2,1) - I_{\text{во}}(2,1)| & \dots & |I_{\text{эт}}(2, N_y) - I_{\text{во}}(2, N_y)| \\ \dots & \dots & \dots \\ |I_{\text{эт}}(N_x, 1) - I_{\text{во}}(N_x, 1)| & \dots & |I_{\text{эт}}(N_x, N_y) - I_{\text{во}}(N_x, N_y)| \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $I_{\text{раз}}(i, j)$ – значение интенсивности ij -ой отметки на разностном РЛИ.

Представим выражение (4) в виде выборки значений интенсивности $\langle I_{\text{раз}}(1,1), \dots, I_{\text{раз}}(i, j), \dots, I_{\text{раз}}(N_x, N_y) \rangle$ с неизвестной функцией распределения $W_{\text{раз}}(I_{\text{раз}})$. В том случае, когда РЛИ существенно отличаются друг от друга, на разностном РЛИ будет наблюдаться большое количество отметок с высокой интенсивностью. С другой стороны, при полном совпадении РЛИ объектов вектор $I_{\text{раз}}(i, j)$ будет содержать предельно малые значения, соизмеримые с уровнем фона. Тогда принятию решения о сходстве виртуального объекта на РЛИ с реальным будет соответствовать гипотеза об отсутствии в разностном РЛИ отметок с высокой интенсивностью.

Так как плотность распределения значений интенсивности зависит от того, присутствуют в данной выборке сигналы исследуемого объекта или нет, расчет вероятности воспроизведения ВО может быть осуществлен на основе анализа векторов значений интенсивности разностного РЛИ $I_{\text{раз}}(i, j)$ и РЛИ фона $I_{\phi}(i, j)$, на котором располагается исследуемый объект, с плотностями распределения $W_{\text{раз}}(I_{\text{раз}})$ и $W_{\phi}(I_{\phi})$ соответственно. При этом могут быть приняты решения, схематично представленные на рисунке 1.

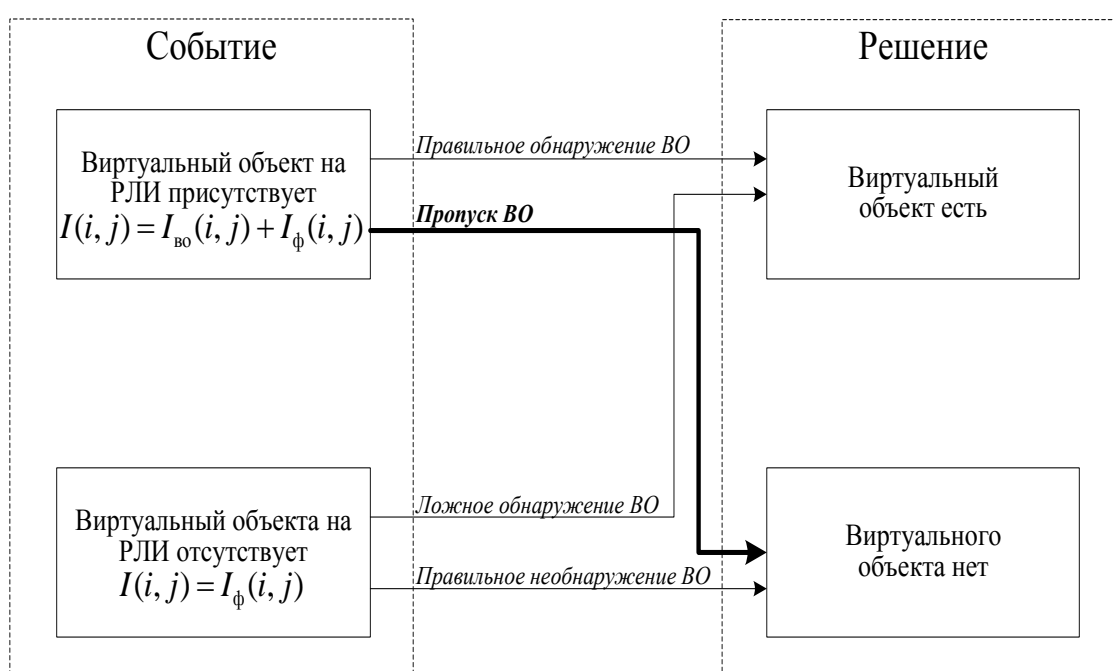


Рисунок 1. Схема принятия решения об обнаружении виртуального объекта на РЛИ при решении задач калибровки РСА

В рассматриваемом случае наибольший интерес представляет вариант «Пропуск ВО», когда при наличии ВО принимается решение о его отсутствии, что будет характеризоваться вероятностью воспроизведения ВО ($P_{\text{вво}}$). Данная ситуация

возможна, когда $I_{\text{раз}}(i, j) \rightarrow I_{\phi}(i, j)$, т.е. различия между исследуемым ВО на РЛИ и эталоном предельно малы.

Для расчета указанной вероятности $P_{\text{вво}}$ в соответствии с критерием Неймана-Пирсона для заданного значения вероятности ложной тревоги $P_{\text{лт}}$, в качестве которой выступает вероятность ложного обнаружения ВО, вычисляется порог $I_{\text{пор}}$ из выражения:

$$P_{\text{лт}} = \int_{-\infty}^{I_{\text{пор}}} W_{\phi}(I_{\phi}) dI. \quad (5)$$

После чего рассчитывается вероятность воспроизведения виртуального объекта в соответствии с выражением:

$$P_{\text{вво}} = \int_{I_{\text{пор}}}^{\infty} W_{\text{раз}}(I_{\text{раз}}) dI. \quad (6)$$

Расчет показателей качества (коэффициента корреляции, СКО формирования ВО и вероятности воспроизведения ВО) осуществляется в соответствии с алгоритмом, схема которого представлена на рисунке 2.

В качестве исходных данных для оценивания выступают:

- матрица значений интенсивности эталонного РЛИ $I_{\text{эт}}$, содержащего реальный имитируемый объект;

- матрица значений интенсивности исследуемого РЛИ $I_{\text{во}}$, на котором изображен ВО;

- параметры съемки и текущие навигационные параметры носителя РСА, используемые для построения модели его движения;

- характеристики бортовой аппаратуры РСА (несущая частота, вид зондирующего сигнала, ширина спектра, длительность зондирующего импульса, период повторения и др.).

Особенностью формирования исходных данных является то, что при расчетах используются нормированные РЛИ. В случае несовпадения ряда геометрических параметров проводится коррекция и масштабирование, после чего на исследуемом РЛИ выделяется область интереса, содержащая виртуальный объект (блок 4, рисунок 2).

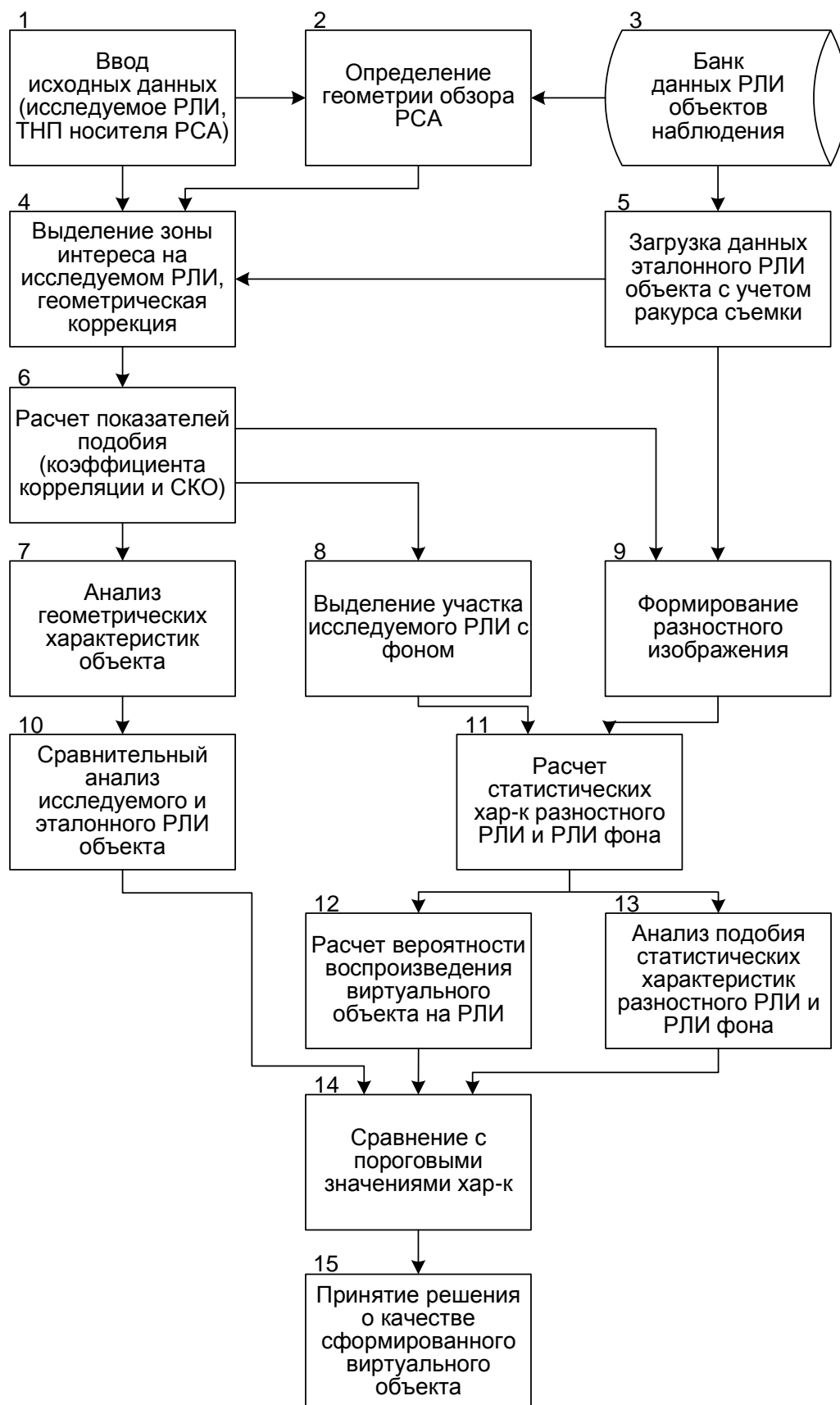


Рисунок 2. Порядок расчета показателей качества формирования виртуального объекта на РЛИ

На основе сформированных матриц значений интенсивности эталонного и виртуального объектов осуществляется расчет значения коэффициента корреляции (2) и СКО формирования ВО (3). Далее производится формирование разностного изображения, РЛИ фона с последующим расчетом вероятности воспроизведения ВО для заданного значения вероятности ложной тревоги (5, 6). Полученное значение сравнивается с пороговым значением, определяемым исходя из требуемого качества калибровки РСА, и принимается решение о качестве формирования ВО на РЛИ.

2. Результаты моделирования процесса воспроизведения виртуального объекта на радиолокационном изображении

Разработанная методика оценивания качества формирования апробирована в ходе проведения полунатурного моделирования [16-18]. Оценивание качества сформированных ВО на РЛИ производилась следующим образом:

- в качестве исходных данных использовалось РЛИ эталонного объекта, полученное в ходе полунатурного моделирования;
- формировалась модель имитируемого объекта;
- на основе заданной модели объекта, априорно известных параметров зондирующего сигнала и геометрии обзора РСА формировался тестовый траекторный сигнал [2, 19, 20], позволяющий сформировать ВО на РЛИ;
- производился синтез РЛИ на основе аддитивной смеси реальной записанной радиоголограммы и сформированного тестового траекторного сигнала [11, 12, 20];
- выполнялся анализ полученного РЛИ на предмет качества сформированного ВО.

Примеры РЛИ эталонного и виртуального объектов представлены на рисунке 3.

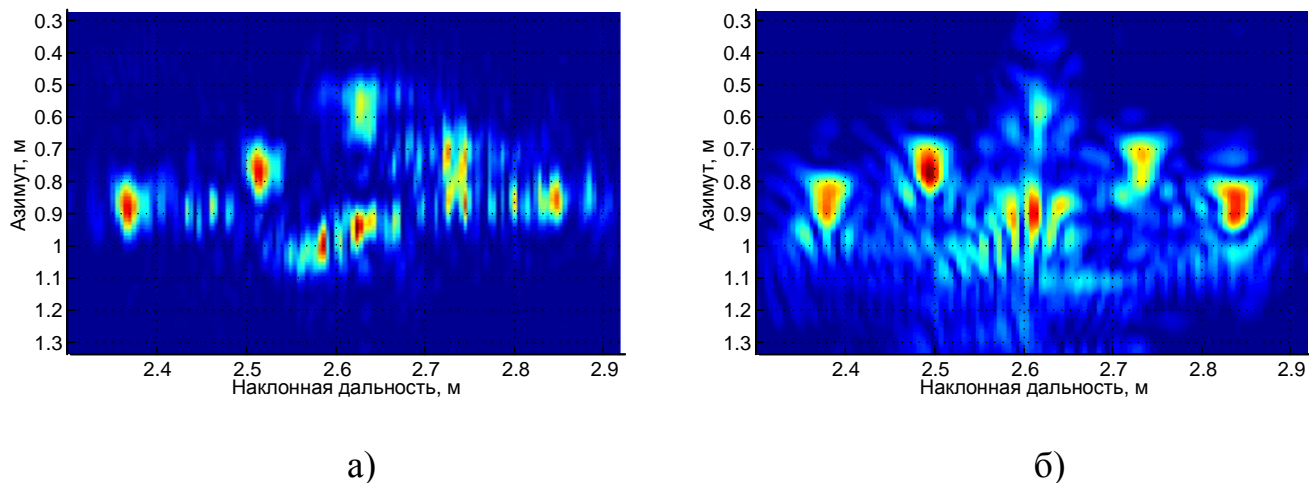


Рисунок 3. РЛИ эталонного (а) и виртуального (б) объектов

Предварительно при расчете показателей подобия формировалась двумерная функция корреляции с использованием маски, в качестве которой использовалось эталонное РЛИ. По максимальному значению функции производилось совмещение полученных РЛИ. Срез двумерной функции корреляции по координатам азимута и дальности для рассматриваемых РЛИ представлен на рисунке 4.

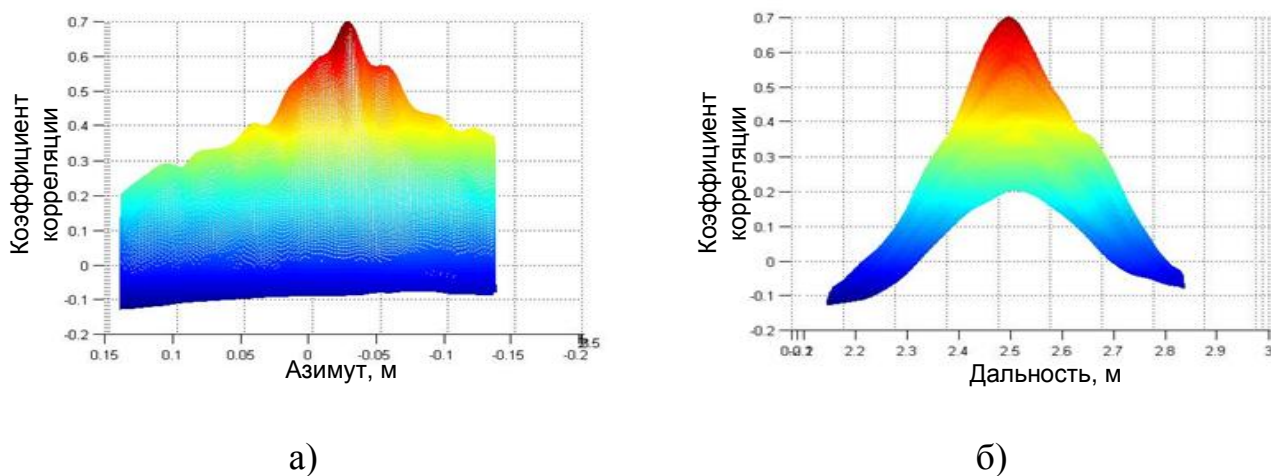


Рисунок 4. Срез двумерной функции корреляции РЛИ эталонного и виртуального объектов по дальности (а) и азимуту (б)

Разностное РЛИ и РЛИ фона, полученные на следующем этапе оценивания, представлены на рисунке 5.

Далее, с использованием выражений (5) и (6) рассчитывалось значение вероятности воспроизведения ВО на РЛИ, которое для значения $P_{лт}=0,01$ составило $P_{вво}=0,81$.

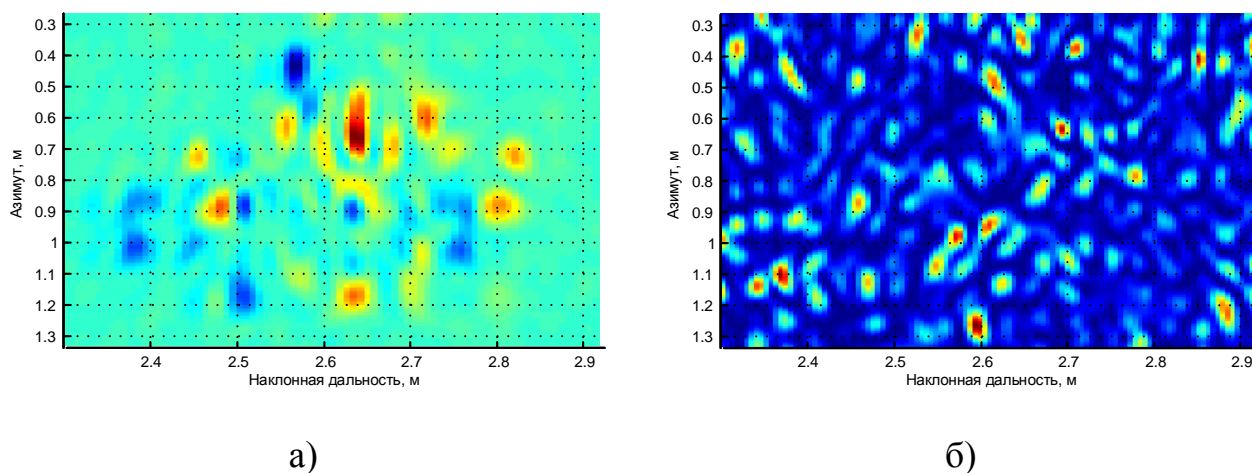
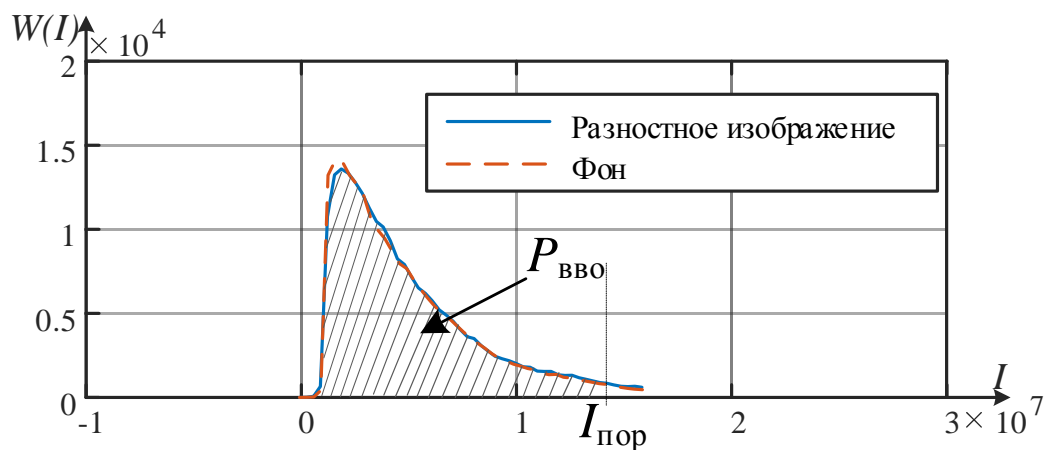
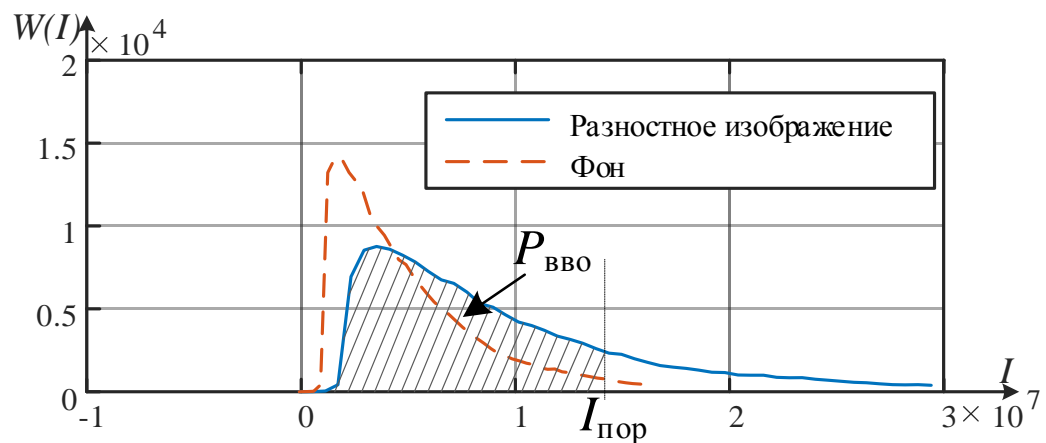


Рисунок 5. Разностное РЛИ (а) и РЛИ фона (б)

Полученным результатам можно дать наглядное геометрическое представление. На рисунке 6 изображены плотности распределения значений интенсивности РЛИ фона и разностных РЛИ при различных степенях подобия виртуального и эталонного объектов.



а)



б)

Рисунок 6. Плотность распределения значений интенсивности РЛИ и фона:

а) при высокой ($P_{\text{ВВО}}=0,95$) степени подобия виртуального объекта;

б) при низкой ($P_{\text{ВВО}}=0,7$) степени подобия виртуального объекта

Как видно из рисунка 6, при высокой степени подобия оба РЛИ содержат преимущественно отметки, являющиеся результатом обработки эхо-сигналов, отраженных от подстилающей поверхности, в связи с чем графики плотности распределения идентичны. В случае низкой степени подобия виртуального объекта, на разностном РЛИ наблюдаются отметки с высокой интенсивностью, результатом

чего является смещение графика плотности распределения в сторону больших значений и, соответственно, снижение вероятности воспроизведения виртуального объекта.

Заключение

В работе разработана методика оценивания качества формирования ВО на РЛИ при решении задач калибровки радиолокационного тракта РСА. Предложенная методика позволяет получить количественные оценки степени подобия виртуальных и реальных объектов на РЛИ с использованием корреляционного анализа и теории обнаружения сигналов. Результаты имитационного моделирования, приведенные в работе, свидетельствуют о корректности подхода, а полученные подобным образом численные значения могут лечь в основу разработки перспективных способов калибровки РСА.

Библиографический список

1. Лепехина Т.А., Николаев В.И., Семенов М.А., Чарыков И.В., Чикачев В.С. Оборудование радиолокационного полигона для калибровки и валидации космических радаров с синтезированной апертурой // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева. 2013. № 5. С. 26 - 29.
2. Jirousek M, Döring B.J, Looser P., Schwerdt M. Linearity Measurements of an Accurate Transponder for Calibrating Future Spaceborne SAR Systems // Proc. of 9th

European Conference on Synthetic Aperture Radar Conference, EUSAR 2012, Nuremberg, Germany, 2012, pp. 67 - 70.

3. Ефимов Е.Н., Шевгунов Т.Я. Идентификация точечных рассеивателей радиолокационных изображений с использованием нейронных сетей радиально-базисных функций // Труды МАИ. 2013. № 68. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41959>
4. Романенко А.В. Формирование доплеровских портретов воздушных объектов с использованием метода сверхразрешения // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar15/9/text.html>
5. Гусев С.Н. Методика программного формирования траекторного сигнала при решении задачи калибровки радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 6. С. 368 - 377.
6. Горбунова А.А. Разработка алгоритма получения точечного портрета сложной цели по комплексному радиолокационному изображению // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: http://trudymai.ru/published.php?ID=25366&PAGEN_2=2
7. Тверской Г.Н., Терентьев Г.К., Харченко И.П. Имитаторы эхо-сигналов судовых радиолокационных станций. - Л.: Судостроение, 1973. - 224 с.
8. Тырыкин С.В. Модели радиолокационных объектов, построенные из зависимых отражателей, и имитация эхосигналов на их основе: автореф. дис. канд. техн. наук. - Новосибирск: НГТУ, 2005. - 229 с.
9. Ширман Я.Д. Багдасарян С.Т. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: справочник. - М.: Радиотехника, 2007. - 512 с.

10. Ширяев А.Н. Вероятностно-статистические методы в теории принятия решений. - М.: МЦНМО, 2011. - 144 с.
11. Верба В.С., Неронский Л.Б, Осипов В.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. - М.: Радиотехника, 2010. - 680 с.
12. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. - М.: Радиотехника, 2005. - 368 с.
13. Кук Ч., Берндфильд М. Радиолокационные сигналы. - М.: Советское радио, 1971. - 568 с.
14. Лисиенко В.Г., Трофимова О.Г., Трофимов С.П., Дружинина Н.Г., Дюгай П.А. Моделирование сложных вероятностных систем. - Екатеринбург: УрФУ, 2011. - 200 с.
15. Волосюк В.К., Павликов В.В. Цифровые методы обработки информационных процессов. - Харьков: Харьковский авиационный институт, 2012. Т. 2. - 78 с.
16. Важенин В.Г. и др. Полунатурное моделирование бортовых радиолокационных систем, работающих по земной поверхности. - Екатеринбург: УрФУ, 2015. - 208 с.
17. Гусев С.Н. Моделирование многопозиционной радиолокационной системы с синтезированной апертурой антенны с использованием ультразвукового диапазона длин волн // Труды XXVIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 16-17 апреля 2013). - Спб.: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2013. С. 419 - 429.

18. Короленко П.В., Рыжикова Ю.В. Моделирование и обработка случайных сигналов и структур. - М.: МГУ, 2012. - 67 с.
19. Liu Chun-Yang, Jiao Yong-Chang. SAR Echo-wave Signal Simulation Systems Based on MATLAB // International Conference Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2012, vol. 5, pp. 1 - 4.
20. Белоруцкий Р.Ю., Киселев А.В., Степанов М.А., Тырыкин С.В. Имитация эхосигналов РСА на основе заранее подготовленного сигнала при отклонении направления и модуля вектора скорости носителя // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Общетеχνическая. 2015. Вып. 5. № 5. С. 7 - 15.

Статья поступила в редакцию 07.12.2018