

Модель имитатора тестовых радиолокационных сигналов авиационных систем обзора земной поверхности

Гусев С.Н.*, Миклин Д.В.**

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

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

***e-mail: miklin.dmitriy@gmail.com*

Статья поступила 08.05.2020

Аннотация

В работе описывается модель имитатора тестовых радиолокационных сигналов авиационных систем обзора земной поверхности. Раскрывается используемый в имитаторе метод цифрового формирования тестовых радиолокационных сигналов, воспроизводящих виртуальные объекты различной структуры на радиолокационных изображениях. Приводятся результаты апробации модели, полученные при проведении полунатурных экспериментов.

Ключевые слова: радиолокационная система с синтезированной апертурой антенны, радиолокационное изображение, имитация сигнала, калибровка, виртуальный объект.

Введение

По состоянию на сегодняшний день одними из ключевых элементов авиационных системы обзора земной поверхности (ОЗП), обеспечивающими

эффективное решение широкого круга хозяйственных и научных задач, являются радиолокационные системы с синтезированной апертурой антенны (РСА). В первую очередь это обусловлено высокими темпами развития элементной базы и технологий цифровой обработки сигналов (ЦОС), что позволяет достичь существенного улучшения технических характеристик РСА. Данный аспект в совокупности с функциональными особенностями РСА, позволяющими осуществлять всепогодную круглосуточную съемку земной поверхности, определяет высокое качество полученных по результатам съемки радиолокационных изображений (РЛИ).

В свою очередь, на качество РЛИ влияет большое количество внешних и внутренних факторов, приводящих к несоответствию реальных и потенциально достижимых значений информационных показателей РСА, что является неприемлемым для потребителя. Указанное обстоятельство приводит к необходимости периодического подтверждения требуемого качества предоставляемых РЛИ путем определения значений информационных показателей для различных условий функционирования. Валидация информационных показателей РСА, таких как пространственная и радиометрическая разрешающая способность, радиометрическая чувствительность, осуществляется с использованием калибровочных полигонов. Однако по ряду причин (например, погрешностей ориентации либо повреждения эталонных объектов) результаты калибровки не всегда могут гарантировать соответствия измеренных параметров текущему состоянию исследуемой РСА.

Альтернативным методом калибровки РСА, избавленного от указанного недостатка, является использование транспондеров [1–4], осуществляющих ретрансляцию принятого от РСА зондирующего сигнала, имитируя отклик от точечных целей. В то же время воспроизведение на РЛИ сложных сосредоточенных целей, необходимых для калибровки, является не тривиальной задачей и требует разработки соответствующих моделей и алгоритмов синтеза траекторного сигнала сложных сосредоточенных целей. В связи с этим актуализируется задача разработки модели имитатора тестовых радиолокационных сигналов, осуществляющего излучение сформированного по заданному алгоритму траекторного сигнала цели, что позволит имитировать на РЛИ эталонные объекты заданной структуры для калибровки РСА.

1. Структура модели имитатора тестовых сигналов

Принцип имитации объектов на РЛИ изложен в ряде работ [3–10] и предполагает формирование траекторного сигнала цели, являющегося результатом суперпозиции эхо-сигналов от совокупности геометрически распределенных точечных отражателей (ТО) в составе сложного сосредоточенного объекта. В связи с этим необходимым условием решения поставленной задачи является описание процесса формирования в имитаторе траекторного сигнала цели с учетом характера движения носителя РСА и особенностей формирования траекторного сигнала целей, результатом обработки которого системой ЦОС РСА является воспроизведение на РЛИ тестовых отметок. Для описания данного процесса была разработана

программная модель имитатора тестовых радиолокационных сигналов авиационных систем обзора земной поверхности.

В предлагаемой модели имитатора используется классическая теория синтеза РЛИ, основанная на согласованной фильтрации принятого сигнала с применением опорной функции, точно компенсирующей закон распределения фазы сигнала, записанного в процессе движения РСА по траектории полета [1]. Учитывая, что принцип формирования траекторного сигнала как одиночных, так и пространственно-распределенных распределенных целей, рассматриваемых в рамках данной работы, не зависит от режима реализуемого обзора, модель движения носителя РСА строится с учетом следующих допущений:

- РСА работает в режиме бокового (переднебокового) обзора;
- на интервале синтезирования носитель РСА движется прямолинейно;
- фазовый центр антенны жестко связан с конструкцией носителя РСА;
- не учитывается рефракция при распространении радиоволн и искажения радиосигналов в атмосфере.

С учетом введенных допущений программная модель имитатора тестовых сигналов в режиме калибровки РСА будет иметь вид, представленный на рисунке 1.

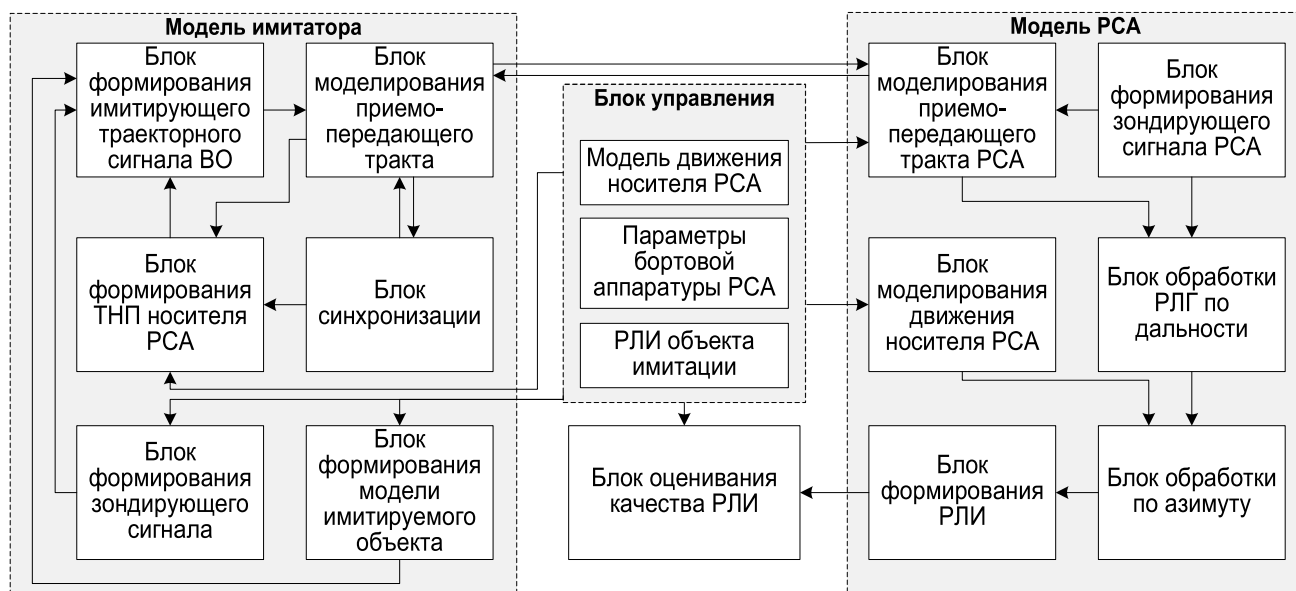


Рисунок 1. Структурная схема модели имитатора тестовых сигналов системы ОЗП

В соответствии с предложенной структурой имитатора для формирования тестового сигнала в имитаторе необходимо определить основные соотношения для расчета имитирующего траекторного сигнала сложного сосредоточенного объекта, зависящих от характеристик объекта имитации и его местоположения.

2. Краткое описание метода цифрового формирования тестовых сигналов

В основе формирования тестового сигнала в имитаторе лежит принцип создания на входе приемника РСА пачки когерентных импульсов, отраженных от эквивалентных ТО, расположенных в соответствии с заданной моделью имитируемого объекта. Аналитическое описание модели РСА позволило выявить основные закономерности формирования траекторного сигнала ТО, обрабатываемого системой ЦОС РСА, в соответствии с которыми n -ая строка комплексной радиоголограммы (КРЛГ) при использовании сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) имеет вид [1, 11–14]:

$$\dot{u}_r^{\text{TO}}(\eta_n, t) = F^{\text{TO}} \cdot w_a(\eta_n) \cdot \dot{u}_{\text{зонд}} \left(t - \frac{2R^{\text{TO}}(\eta_n)}{c} \right) \cdot \exp \left(j2\pi f_0 \frac{2R^{\text{TO}}(\eta_n)}{c} \right) + n_r(\eta_n, t), \quad (1)$$

где: $t \in [2R_{\min}/c, 2R_{\min}/c + \tau_u]$ – «быстрое» время; R_{\min} – минимальная наклонная дальность от фазового центра антенны (ФЦА) до ТО; $\eta \in [0, T_c]$ – «медленное» время; T_c – время синтезирования; F^{TO} – коэффициент отражения ТО; $w_a(\eta)$ – коэффициент, учитывающий влияние диаграммы направленности антенны (ДНА); $\dot{u}_{\text{зонд}}(\eta, t)$ – комплексная огибающая зондирующего ЛЧМ-сигнала; R^{TO} – наклонная дальность от ФЦА до ТО; c – скорость света; f_0 – несущая частота зондирующего сигнала; $n_r(\eta, t)$ – шумы приемника.

В свою очередь КРЛГ сложной сосредоточенной цели, является результатом суперпозиции эхо-сигналов от совокупности ТО в составе имитируемого объекта. Согласно [7, 15, 16] объект имитации в виде совокупности ТО, графическое представление которого приведено на рисунке 2, описывается двумерными массивами значений интенсивности отклика ТО и их координат в системе отсчета, связанной с имитатором:

$$F_{\text{cco}}^{\text{BO}} = \begin{bmatrix} F_{11}^{\text{BO}} & F_{12}^{\text{BO}} & \dots & F_{1M}^{\text{BO}} \\ F_{21}^{\text{BO}} & F_{ij}^{\text{BO}} & \dots & F_{2M}^{\text{BO}} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ F_{N1}^{\text{BO}} & F_{N2}^{\text{BO}} & \dots & F_{NM}^{\text{BO}} \end{bmatrix}, \quad S_{\text{cco}}^{\text{BO}} = \begin{bmatrix} S_{11}^{\text{BO}} & S_{12}^{\text{BO}} & \dots & S_{1M}^{\text{BO}} \\ S_{21}^{\text{BO}} & S_{ij}^{\text{BO}} & \dots & S_{2M}^{\text{BO}} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ S_{N1}^{\text{BO}} & S_{N2}^{\text{BO}} & \dots & S_{NM}^{\text{BO}} \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} i = \overline{1, N} \\ j = \overline{1, M} \end{matrix}, \quad (2)$$

где: $F_{\text{cco}}^{\text{BO}}$ – массив нормированных значений интенсивности ТО сложного сосредоточенного объекта; $S_{\text{cco}}^{\text{BO}}$ – массив значений координат ТО в составе сложного сосредоточенного объекта относительно опорной точки в формате

$S_{ij}^{BO} = [x_{ij}^{BO}, y_{ij}^{BO}]$; $N \times M$ – количество ТО в составе сложного сосредоточенного объекта.

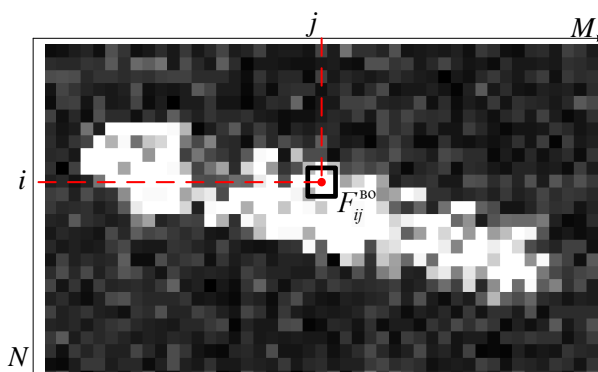


Рисунок 2. Графическое представление объекта имитации

Выражение (1) описывает эхо-сигнал, отраженный от любой точки пространства, в связи с чем аналогичные расчеты могут быть использованы для расчета сигнала, излучаемого имитатором, расположенного в точке (x_n, y_n) . Однако при расчетах следует учитывать, что отметки виртуального объекта с координатами $(x_{ij}^{BO}, y_{ij}^{BO})$ будут вынесены относительно ФЦА имитатора на некоторое расстояние по азимуту и дальности, что влечет за собой необходимость внесения в сигнал временной задержки для каждого ij -го ТО в составе виртуального объекта:

$$\Delta\tau_{ij}^{BO}(\eta_n) = \frac{2R_{ij}^{BO}(\eta_n)}{c} - \frac{2R^n(\eta_n)}{c}, \quad (3)$$

где: R_{ij}^{BO}, R^n – наклонная дальность от ФЦА до ij -го виртуального ТО и до имитатора соответственно.

Кроме того, данное обстоятельство приводит к несоответствию доплеровского спектра частот траекторного сигнала виртуального ТО при его выносе по азимуту, а также нарушению геометрии волнового фронта, что в свою очередь влияет на

качество формирования виртуального объекта. Поэтому для достижения подобия имитируемого эхо-сигнала и отклика, полученного при наблюдении реальной цели в заданной точке пространства, наряду с амплитудным взвешиванием и временной задержкой сигнала, требуется коррекция фазы и доплеровского спектра частот на величину:

$$\Delta\varphi_{ij}^{\text{BO}}(\eta_n) = \frac{4\pi f_0}{c} (R_{ij}^{\text{BO}}(\eta_n) - R^{\text{H}}(\eta_n)),$$

$$\Delta f_{dij}^{\text{BO}}(\eta_n) = \frac{2f_0 v_{le\text{H}}}{c} \left((v'_{le\text{H}} \eta_n - x_{\text{H}}) \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{грав } ij}^{\text{BO}}} - \frac{1}{R_{\text{грав}}^{\text{H}}} \right) - \frac{x_{ij}^{\text{BO}}}{R_{\text{грав } ij}^{\text{BO}}} \right), \quad (4)$$

где: $R_{\text{грав}}^{\text{BO}}$, $R_{\text{грав}}^{\text{H}}$ – расстояние от ФЦА до виртуального объекта и до имитатора в траверзе.

Учитывая выражения (2-4), строку КРЛГ, реализованной путем записи имитирующего траекторного сигнала виртуального объекта, можно представить в виде:

$$u_r^{\text{BO}}(\eta_n, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M k_{Fij}^{\text{BO}} \cdot F_{ij}^{\text{BO}} \cdot \text{rect} \left(\frac{t - \tau_{\text{H}}/2 - 2R^{\text{крп}}(\eta_n)/c - \Delta\tau_{ij}^{\text{BO}}}{\tau'_{\text{H}}} \right) \cdot \exp \left(j2\pi (f_0 + \Delta f_{dij}^{\text{BO}}) \frac{2R^{\text{крп}}(\eta_n)}{c} + \right. \\ \left. + j\pi \frac{\Delta F'}{\tau'_{\text{H}}} \left(t - \frac{\tau_{\text{H}}}{2} - \frac{2R^{\text{крп}}(\eta_n)}{c} - \Delta\tau_{ij}^{\text{BO}} \right)^2 \right) + n_r(\eta_n, t), \quad (5)$$

где: $k_{Fij}^{\text{BO}}(\eta_n)$ – коэффициент амплитудной коррекции; ΔF – ширина спектра ЛЧМ сигнала; τ_{H} – длительности ЛЧМ импульса.

Таким образом, формирование в имитаторе траекторного сигнала имитируемого объекта в соответствии с выражением (5) позволяет сформировать тестовую КРЛГ для калибровки РСА. Обработка записанной КРЛГ в модели РСА

осуществляется по типовой схеме с последовательной обработкой по дальности и азимуту. Блок оценивания результативности РЭП позволяет рассчитать выбранные в первой главе показатели качества формирования виртуальных объектов с учетом исходных данных по характеристикам имитируемого объекта и сценария постановки помех [17].

3. Результаты полунатурного эксперимента по воспроизведению виртуального объекта на радиолокационном изображении

Отработка разработанной модели проводилась методом полунатурного моделирования с использованием локационного акустического комплекса [11, 15, 18–19, 20]. Методика проведения эксперимента с использованием комплекса предусматривает три этапа: предварительное математическое моделирование, непосредственное проведение эксперимента с использованием комплекса, оценку качества формирования виртуальных объектов на РЛИ [10].

На первом этапе с использованием описанного выше математического аппарата производится математическое моделирование процесса воспроизведения виртуальных объектов на РЛИ. Моделирование реализовано на базе штатного специального программного обеспечения комплекса в среде MATLAB, без задействования его аппаратной части, с использованием программного компонента, позволяющего имитировать необходимые сигнатуры и фоноцелевую обстановку. Анализ результатов математического моделирования позволяет разработать оптимальный вариант проведения эксперимента и уточнить алгоритм функционирования имитатора.

На втором этапе с учетом полученных ранее данных составляется программа эксперимента, формируются исходные данные и устанавливается режим работы РСА, определяется геометрическое построение системы и состав ФЦО, уточняются параметры зондирующих и тестовых сигналов. Далее, в соответствии с разработанной программой, проводится эксперимент.

В ходе проведенного полунатурного эксперимента был воспроизведен процесс формирования виртуального объекта сложной формы (надводного корабля) на РЛИ. Результаты имитационного моделирования, а именно: реальное РЛИ корабля, а также РЛИ с виртуальным объектом приведены на рисунке 3.

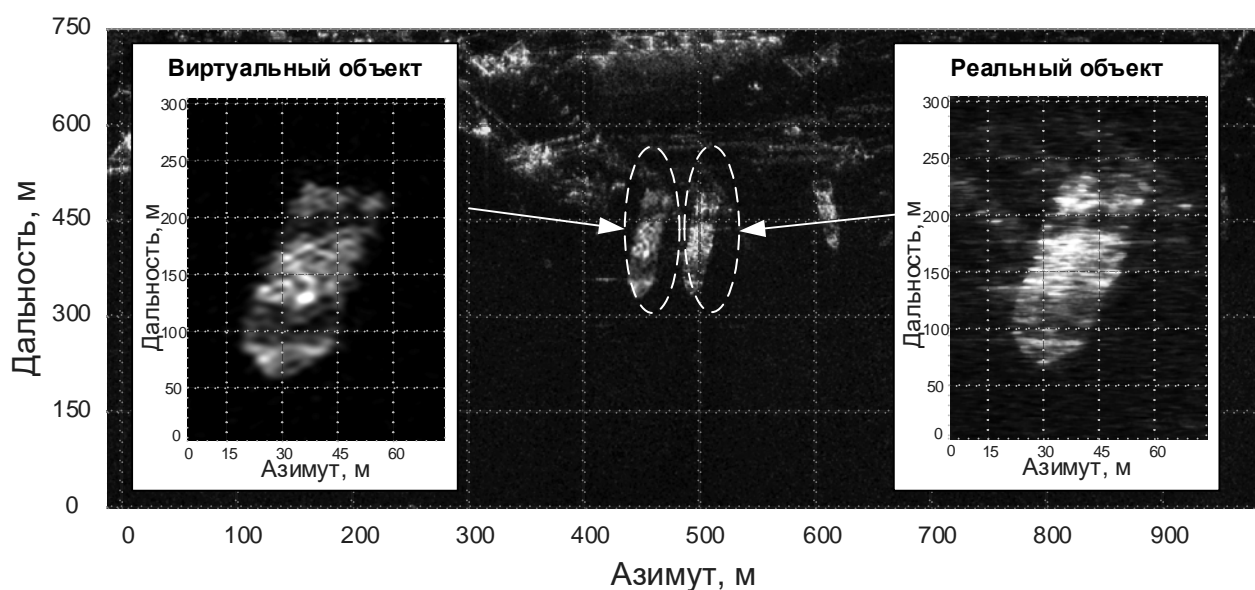


Рисунок 3. Результаты имитационного моделирования процесса воспроизведения виртуального объекта на РЛИ

1. Оценка качества сформированного виртуального объекта осуществлялась по методике [10]. Значение показателя качества формирования ВО (вероятности воспроизведения виртуального объекта), составило $P_{\text{ВВО}} = 0,91$, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Заключение

Применение разработанной модели имитатора тестовых радиолокационных сигналов авиационных систем обзора земной поверхности позволит отработать алгоритмы калибровки РСА, а в случае ее аппаратной реализации осуществлять калибровку указанных систем.

Отличительной чертой предложенной модели является синтез имитирующего траекторного сигнала сложной сосредоточенной цели, сформированного совокупностью точечных отражателей, с учетом амплитудного взвешивания, временной задержкой сигнала, коррекция фазы и доплеровского спектра частот, что позволяет наиболее точно описать траекторный сигнал сложного объекта.

Полученные по результатам полунатурного моделирования значения показателей качества формирования виртуальных объектов являются достаточными для решения задач калибровки РСА авиационного базирования с использованием имитаторов тестовых радиолокационных сигналов.

Библиографический список

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Турук В.Э. Перспективные технологии цифровой обработки радиолокационной информации космических РСА: монография. – М.: Радиотехника, 2019. – 416 с.
2. Захаров А.И., Жердев П.А., Борисов М.М., Соколов А.Б. Калибровка современных космических РСА с помощью антенных рефлекторов // II Всероссийская научная конференция «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы

аэрокосмическими методами»: сборник докладов (Санкт-Петербург, 16-18 июня 2004). – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2004. Т. 3. С. 47 – 50.

3. 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.

4. 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.

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. Тырыкин С.В. Модели радиолокационных объектов, построенные из зависимых отражателей, и имитация эхосигналов на их основе: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.12.14. – Новосибирск: НГТУ, 2005. 229 с.

8. Булыгин М.Л., Муллов К.Д. Формирователь зондирующего сигнала для радиолокатора с синтезированной апертурой // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=5704>
9. Валов С.В., Сиротин А.И., Щербаков С.В. Имитатор сигнала радиолокатора с синтезированной апертурой // Патент на изобретение RU 2522502 С1, 20.07.2014.
10. Белоруцкий Р.Ю. Цифровые методы имитации эхосигналов РЛС с синтезированием апертуры антенны: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.14. – Томск: НГТУ, 2014. – 204 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. Кук Ч., Берндфильд М. Радиолокационные сигналы: перевод с английского. - М.: Советское радио, 1971. – 568 с.
13. Кондратенков Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. - М: Радиотехника, 2005. - 368 с.
14. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: справочник. – М.: Радиотехника, 2007. – 560 с.
15. Гусев С.Н. и др. 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.
16. 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>

17. Гусев С.Н., Сахно И.В., Хуббиев Р.В. Методика оценивания качества формирования виртуальных объектов на радиолокационных изображениях // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102169>

18. Важенин В.Г. Полунатурное моделирование бортовых радиолокационных систем, работающих по земной поверхности. - Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2015. 208 с.

19. Звонарев В.В., Мороз А.В., Шерстюк А.В. Методика оценивания характеристик диаграммы направленности ультразвукового локатора в режиме синтезирования апертуры антенны // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=10568>

20. Гусев С.Н., Харжевский Е.В. Преобразование динамического диапазона радиолокационных изображений на основе методов тональной компрессии // 7-я международная научно-техническая конференция "К.Э. Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика": тезисы докладов. (Рязань, 4-6 октября 2017). – Рязань: РГРТУ, 2017. С. 316 - 320.

Model of the test radio signals simulator for aviation systems of the Earth surface surveying

Gusev S.N.*, Miklin D.V.**

*Military space academy of A.F.Mozhaysky,
13, Zhdanovskaya str., Saint Petersburg, 197198, Russia*

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

***e-mail: miklin.dmitriy@gmail.com*

Abstract

The article presents description of the model of the test radar signals simulator designed for calibration problems solving of air borne synthetic aperture radar systems (SAR). Control algorithms, employed in the simulator, for forming simulating trajectory signals, which reproduce virtual objects on radar images, are being considered as the subject of the study.

The necessity of solving this problem is stipulated, firstly, by the complexity of SAR calibration for complex objects, employing calibration polygons; secondly, by the lack of a uniform approach to the calibration means development based on simulators, employing the retranslation principle of the SAR probing signal. Thus, the purpose of the article consists in developing a model of the test radar signals, allowing reproducing the target environment with the specified set of object of various structure on the radar.

The proposed model is based on application of the theory of spatial and temporal signal processing in SAR and computer modelling techniques, from which the viewpoint the target simulating trajectory signal is the sum of the reflected signals from the point reflectors in a complex concentrated target. Each echo signal from the point reflector

herewith should be computed with account for the position and the nature of the reflection in the specified direction.

The developed model peculiarity consists in frequency correction procedure integration into the algorithm for simulating trajectory signal formation. It allows compensating the geometry violation of the wave front and the change in Doppler frequency spectrum, caused by the objects reproduction at the certain distance from the simulator location.

The result of the work represents the model structure of the test radar signals simulator and the algorithm used in the model for computing the simulated trajectory signal of a complex concentrated target with account for the time delay, amplitude and frequency correction.

The developed model was tested while seminatural simulation of the reproduction process of virtual objects on radar. The seminatural simulation results presented in the work proved the approach correctness and the adequacy of the developed model.

The proposed model can be employed at:

- SAR calibration at different stages of development and design;
- developing of simulators for the signals programming;
- substantiating the trends of methods and means developing of radar systems

calibration for the Earth's surface observing.

Keywords: radar system with synthetic aperture antenna, radar image, signal simulation, calibration, virtual object.

References

1. Verba V.S., Neronskii L.B., Turuk V.E. *Perspektivnyye tekhnologii tsifrovoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii kosmicheskikh RSA* (Prospective technologies of spacecraft SAR radar information digital processing), Moscow, Radiotekhnika, 2019, 416 p.
2. Zakharov A.I., Zherdev P.A., Borisov M.M., Sokolov A.B. *Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya "Distantzionnoe zondirovanie zemnykh pokrovov i atmosfery aerokosmicheskimi metodami": sbornik dokladov* (Saint-Peterburg, 16-18 June, 2004), Saint Petersburg Izd-vo RGGMU, 2004, vol. 3, pp. 47 – 50.
3. Lepekhina T.A., Nikolaev V.I., Semenov M.A., Charykov I.V., Chikachev V.S. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva*, 2013, no. 5, pp. 26 - 29.
4. 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.
5. Gusev S.N. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 6, pp. 368 - 377.
6. Gorbunova A.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 45, available at: http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25366&PAGEN_2=2
7. Tyrykin S.V. *Modeli radiolokatsionnykh ob"ektov, postroennye iz zavisimykh otrazhatelei, i imitatsiya ekhosignalov na ikh osnove* (Radar objects models built from dependent reflectors, and echo signals imitation on their basis). Doctor's thesis, Novosibirsk, NGTU, 2005, 229 p.

8. Bulygin M.L., Mullov K.D. *Trudy MAI*, 2015, no. 80, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=5704>
9. Valov S.V., Sirotin A.I., Shcherbakov S.V. *Patent na izobrenie RU 2522502 C1*, 20.07.2014.
10. Belorutskii R.Yu. *Tsifrovye metody imitatsii ekhosignalov RLS s sintezirovaniem apertury anteny* (Digital methods for radar echoes simulation with antenna aperture synthesis), Doctor's thesis, Tomsk, NGTU, 2014, 204 p.
11. Verba V.S., Neronskii L.B, Osipov B.G., Turuk V.E. *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space borne radar systems for terrestrial observation), Moscow, Radiotekhnika, 2010, 680 p.
12. Kuk Ch., Berndfil'd M. *Radar signals*, Academic Press Inc., London, 1967, 531 p.
13. Kondratenkov G.S. *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Radio vision. Radar Systems for Earth Remote Sensing), Moscow, Radiotekhnika, 2005, 368 p.
14. Shirman Ya.D. *Radioelektronnye sistemy* (Radioelectronic systems), Moscow, Radiotekhnika, 2007, 560 p.
15. Gusev S.N. et al. *Trudy XXVIII Vserossiiskogo simpoziuma "Radiolokatsionnoe issledovanie prirodnykh sred"* (Sankt-Peterburg, 16-17 April 2013), Sankt-Peterburg, VKA im. A.F. Mozhaiskogo, 2013, pp. 419 – 429.
16. Efimov E.N., Shevgunov T.Ya. *Trudy MAI*, 2013, no. 68, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41959>
17. Gusev S.N., Sakhno I.V., Khubbiev R.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102169>

18. Vazhenin V.G. *Polunaturalnoe modelirovanie bortovykh radiolokatsionnykh sistem, rabotayushchikh po zemnoi poverkhnosti* (Semi natural simulation of airborne radar systems operating along the Earth surface), Ekaterinburg, Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2015, 208 c.
19. Zvonarev V.V., Moroz A.V., Sherstyuk A.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 106, available at: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=10568>
20. Gusev S.N., Kharzhevskii E.V. *7-ya mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "K.E. Tsiolkovskii – 160 let so dnya rozhdeniya. Kosmonavtika. Radioelektronika. Geoinformatika": tezis dokladov* (Ryazan', 4-6 October 2017), Ryazan', RGRTU, 2017, pp. 316 - 320.