

## Ресинтез радиолокационных изображений РСА

Е.Ф. Толстов<sup>1</sup>, К.К. Храмов<sup>2</sup>, В.П. Макаров<sup>2</sup>, В.В. Костров<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> АО «Аэрокон»

140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, 1

E-mail: e\_tolstov@mail.ru

<sup>2</sup> Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, 23

E-mail: hramovkk@gmail.com

<sup>3</sup> АО «НИИ «Субмикрон»

124498, Москва, Зеленоград, Георгиевский просп., 5

E-mail: kostrov.46@mail.ru

*Представлен метод моделирования радиоголограмм для перспективных радиолокационных систем с синтезированием апертуры (РСА) на основе существующих радиолокационных изображений (РЛИ). Метод включает извлечение точечных целей из исходного РЛИ, пересчет их координат в новую геометрию и синтез голограммы с новыми параметрами. Приведены математические соотношения, описан алгоритм, представлены результаты численных экспериментов для точечных целей.*

*Ключевые слова: радиолокатор с синтезированием апертуры антенны, РСА, ресинтез, обратное синтезирование, точечная модель, радиолокационное изображение, РЛИ, синтез радиоголограммы.*

## Resynthesis of SAR radar images

E.F. Tolstov<sup>1</sup>, K.K. Khramov<sup>2</sup>, V.P. Makarov<sup>2</sup>, V.V. Kostrov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> JSC "Aerocon"

<sup>2</sup> Murom Institute of the Vladimir State University

<sup>3</sup> JSC Research Institute "Submicron"

*A method for simulating radar raw data for advanced synthetic aperture radar (SAR) systems based on existing radar images is presented. The method includes extracting point targets from the original radar image, recalculating their coordinates to a new geometry, and synthesizing a raw data with new parameters. Mathematical relationships are provided, the algorithm is described, and the results of simulation for point targets are presented.*

*Keywords: synthetic aperture radar, SAR, resynthesis, back-projection based synthesis, point scatterer model, radar image, raw data simulation.*

## Введение

Разнообразие фоно-целевой обстановки (город, лес, водная поверхность, сельскохозяйственные угодья) обуславливает высокую сложность ее моделирования. Создаваемые натурные полигоны и «виртуальные миры» применяются в основном на этапе летных испытаний и недоступны на стадии проектирования, когда космический аппарат с радиолокационной системой с синтезированием апертуры (РСА) еще не выведен на орбиту. В таких ситуациях большую помощь оказывает компьютерное моделирование.

Существующие методы моделирования радиолокационных сигналов требуют значительных вычислительных ресурсов и детальной априорной информации о сцене.

Вместе с тем накоплен большой массив реальных радиоголограмм и полученных на их основе радиолокационных изображений (РЛИ) действующих или завершивших свои миссии радиолокационных датчиков. Эти данные могут быть использованы в качестве основы для моделирования новых РСА.

Цель настоящей работы – разработка методики моделирования радиоголограмм и РЛИ для отработки алгоритмов обработки вновь создаваемых и перспективных РСА.

### **Обзор методов моделирования**

При трехмерном моделировании сцен для РСА наиболее адекватное описание отраженного сигнала обеспечивает фацетный метод [1]. Он позволяет корректно моделировать эффекты многократного переотражения и затенения, однако требует значительных вычислительных ресурсов.

Более простым с вычислительной точки зрения является метод блестящих точек, при котором сложная цель представляется набором дискретных изотропных отражателей с заданными эффективными площадями рассеяния и координатами [2]. Данный метод эффективен при моделировании разреженных сцен, состоящих из ярко выраженных локальных объектов (техногенные сооружения, транспортные средства), но не учитывает интерференционные эффекты между близко расположенными элементами.

Для моделирования распределенных поверхностей (лесной покров, водная поверхность, сельскохозяйственные угодья) широко применяются статистические модели [3, 4].

При моделировании сцен с выраженным рельефом применяются цифровые модели рельефа [5]. Расчет отраженного сигнала производится с учетом локальных углов падения и затенения.

Наиболее распространенным подходом для верификации алгоритмов обработки РСА является моделирование радиоголограмм (РГ) точечных целей. В этом методе синтезируются данные как когерентная сумма сигналов от заданных дискретных отражателей. Каждый такой сигнал описывается опорной функцией, расчет которой производится в соответствии с известными параметрами траектории носителя (высота, скорость, угол визирования) и зондирующего сигнала (несущая частота, длительность и полоса импульса, частота повторения). Широкополосный шум приемного устройства моделируется как комплексный гауссовский белый шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, определяемой эквивалентной спектральной плотностью шума, приведенной ко входу.

### **Метод обратного синтезирования**

Общая схема метода синтезирования заключается в следующем. Имеется исходная радиоголограмма ( $РГ_0$ ), на основе которой с помощью специального программного обеспечения (ПО) синтезируется базовое радиолокационное изображение  $РЛИ_0$  размером  $H_0 \times W_0$ . В режимах с невысоким или средним разрешением  $РГ_0$  подвергается в основном линейным преобразованиям. Для получения высокого и сверхвысокого разрешения на отдельных этапах синтеза применяются нелинейные преобразования, которые отражают кривизну орбиты, изменение разрешения по угломестной и азимутальной координатам при съемке сцены и т.п. При синтезе учитываются вид модуляции  $M_0$  (ЛЧМ, ФКМ), длительность импульса  $\tau_{и0}$ , период следования импульсов  $T_{п0}$ , угол визирования  $\beta_0$ , высота орбиты  $H_0$ , скорость носителя  $V_0$ , длина волны  $\lambda_0$  и другие параметры съемки:

$$РЛИ_0 = L_0\{РГ_0(P_0)\},$$

где  $L_0$  – комплекс преобразований радиоголограммы (оператор синтеза РЛИ);

$P_0 = \{\tau_{и0}, M_0, T_{п0}, \beta_0, H_0, V_0, \lambda_0\}$  – параметры съемки.

Новая радиоголограмма  $РГ_1$ , получаемая на основе  $РЛИ_0$  методом обратного синтезирования, должна быть функцией параметров съемки другого сенсора (РСА космического аппарата):

$$РГ_1 = L^{-1}\{РЛИ_0(P_0)|P_1\},$$

где  $L^{-1}$  – оператор обратного синтезирования, реализуемый через модель точечных целей;

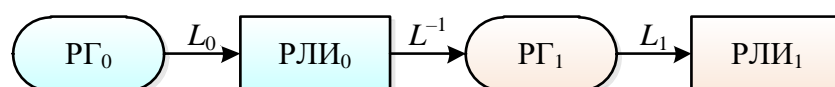
$P_1 = \{\tau_{и1}, M_1, T_{п1}, \beta_1, H_1, V_1, \lambda_1\}$  – набор новых параметров.

Затем с помощью ПО для перспективной (проектируемой) системы решается задача синтеза нового РЛИ размером  $H_1 \times W_1$ :

$$РЛИ_1 = L_1\{РГ_1(P_1)\},$$

которое и подлежит анализу.

Таким образом, на основе РЛИ, полученного в реальных условиях, с помощью метода обратного синтезирования моделируется РЛИ проектируемого изделия (рис.1).



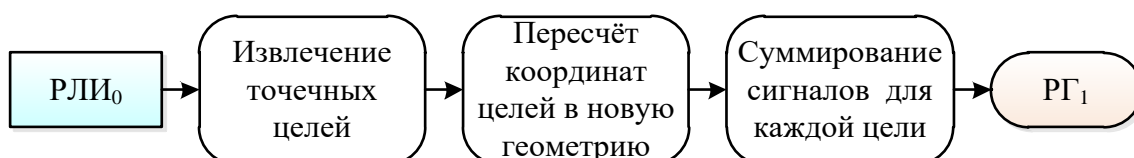
**Рис. 1. Общая схема метода обратного синтезирования**

Процесс преобразования РЛИ в новое изображение с иными параметрами (ресинтез РЛИ) можно разбить на две подзадачи:

- параметрический синтез голограммы – извлечение из базового РЛИ точечных целей, пересчет их координат в систему новой геометрии и синтез новой РГ;
- частотная передискретизация – изменение параметров дискретизации по дальности и азимуту, а также ширины полосы сигнала без изменения геометрии съемки и несущей частоты [6].

### Параметрический синтез голограммы

Алгоритм параметрического синтеза голограммы решает подзадачу формирования новой РГ на основе точечных целей, извлеченных из базового РЛИ (рис. 2).



**Рис. 2. Этапы параметрического синтеза голограммы**

Входное комплексное РЛИ, полученное для параметров съемки  $P_0$  подвергается пороговой обработке. Пиксели, превышающие порог, считаются целями. Их координаты (азимутальный  $i_{az}$  и дальностный  $i_{rg}$  индексы) и комплексные амплитуды фиксируются. Для каждой цели определяется азимутальное время и вычисляется наклонная дальность с использованием некоторой опорной дальности и шага дискретизации, находятся наземные координаты. Положение цели в наземных координатах сохраняется.

Затем осуществляется переход к новым параметрам  $P_1$ , для которых вычисляется закон изменения наклонной дальности  $R_1(t)$  во времени и полный фазовый набег сигнала  $\varphi(t)$ . Амплитуда цели  $A$  в первом приближении сохраняется. Для каждого азимутального отсчета  $i_{az}$  вычисляются текущая наклонная дальность и миграция

дальности. После этого формируется опорный (в рассматриваемом случае – ЛЧМ) сигнал  $s_{rg}(\tau)$  длительностью  $\tau_{и1}$ :

$$s_{rg}(\tau) = \exp \left[ j\pi K_1 \left( \tau - \tau_0 - \frac{\tau_{и1}}{2} \right)^2 \right],$$

где  $K_1 = B_1/\tau_{и1}$  – крутизна ЛЧМ-сигнала с полосой  $B_1$ ;  
 $\tau$  – «быстрое» время, отсчитываемое от момента излучения импульса;  
 $\tau_0 = 2R_1(t)/c$  – задержка сигнала;  
 $t$  – «медленное» (азимутальное) время.

На практике сигнал  $s_{rg}(\tau)$  дискретизируется с частотой  $F_{s1}$ .

Этот сигнал взвешивается и добавляется в строку голограммы с учетом временной задержки. Вклады всех  $N_t$  целей по всем азимутальным отсчетам когерентно суммируются:

$$PG_1(i_{az}, i_{rg}) = \sum_{k=1}^{N_t} \sum_{i_{az}} A_k \cdot s_{rg}[\tau(i_{rg}); R_{1,k}(t_{i_{az}})] \cdot \exp[j\varphi_k(t_{i_{az}})].$$

### Численное моделирование

Рассмотрим пример реализации метода обратного синтезирования для исходного РЛИ, содержащего одну точечную цель в центре изображения. Параметры исходной системы приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Параметры исходного РСА при моделировании**

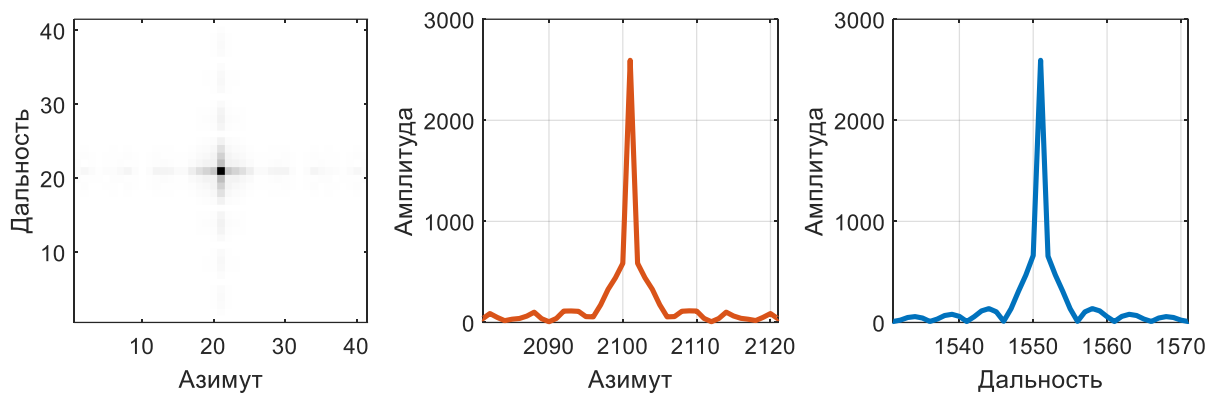
| Параметр  | Значение |
|---|----------|
| Высота орбиты космического аппарата, $H_0$ , км       | 514      |
| Угол визирования, $\beta_0$ , градусы                 | 45       |
| Вид модуляции, $M_0$                                  | ЛЧМ      |
| Длина волны зондирующего сигнала, $\lambda_0$ , см    | 3        |
| Длительность зондирующих импульсов, $\tau_{и0}$ , мкс | 20       |
| Частота дискретизации, $F_{s0}$ , МГц                 | 130      |
| Полоса частот сигнала, $B_0$ , МГц                    | 100      |
| Период следования импульсов, $T_{п0}$ , кГц           | 5        |

На рис. 3 представлено исходное изображение РЛИ<sub>0</sub> (точечная цель в центре). Для верификации алгоритма и программного обеспечения была получена радиоголограмма РГ<sub>1</sub> (рис. 4(а)) и синтезировано новое РЛИ<sub>1</sub> (рис. 5) для тех же параметров, что и у исходного изображения, при пороге, соответствующем одной цели  $N_t = 1$ . Очевидно, что при этом РЛИ<sub>0</sub> и РЛИ<sub>1</sub> совпадают.

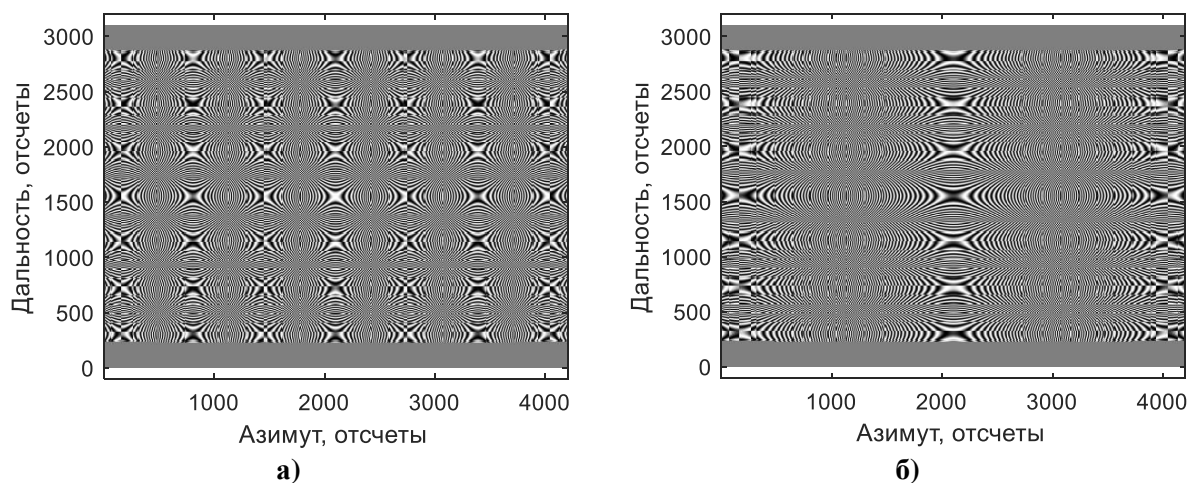
На рис. 6 приведено РЛИ, а на рис. 4(б) – РГ, которые получены для новой системы при  $\lambda_1 = 3\lambda_0$ . На РЛИ хорошо видно расширение отклика цели по азимуту, что соответствует более низкому азимутальному разрешению.

Рассмотренный метод позволяет моделировать голограммы для систем с иными параметрами без детального знания отражательных свойств сцены, используя реальные РЛИ в качестве исходных данных.

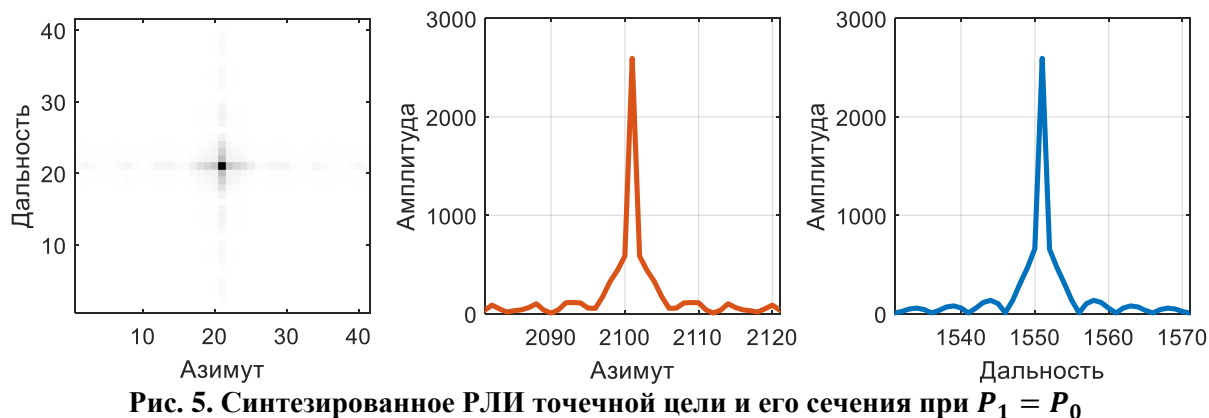
Существенным ограничением является предположение о точечной модели сцены, что допустимо для оценки разрешающей способности, но может быть недостаточно для распределенных целей. Кроме того, при изменении несущей частоты дополнительно может потребоваться пересчет эффективной площади рассеяния цели.



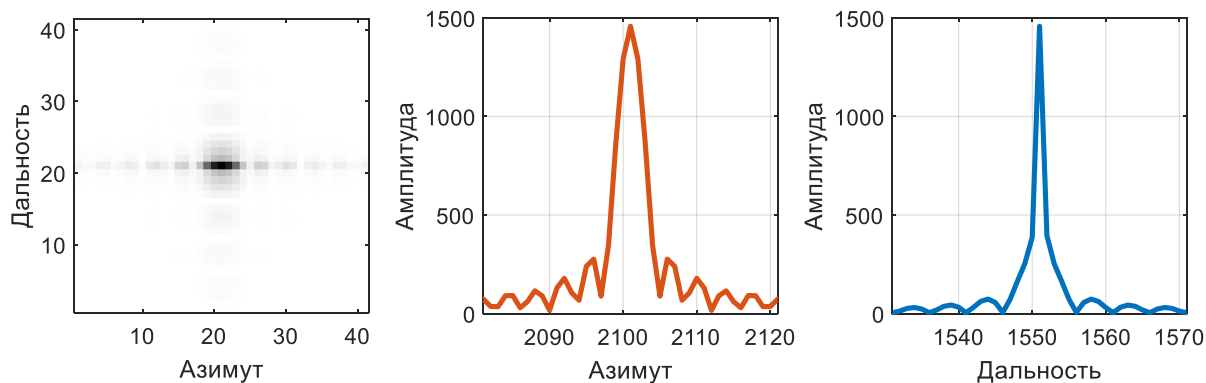
**Рис. 3. Исходное РЛИ точечной цели и его сечения**



**Рис. 4. Радиоголограммы: а) – РГ<sub>1</sub> при  $P_1 = P_0$ , б) – РГ<sub>1</sub> при  $\lambda_1 = 3\lambda_0$**



**Рис. 5. Синтезированное РЛИ точечной цели и его сечения при  $P_1 = P_0$**



**Рис. 6. Синтезированное РЛИ точечной цели и его сечения при  $\lambda_1 = 3\lambda_0$**

## **Заключение**

В работе реализован метод параметрического синтеза голограммы на основе точечных целей, извлеченных из существующего РЛИ. Метод позволяет:

- изменять высоту орбиты, скорость носителя, угол визирования, несущую частоту, период повторения импульсов и частоту дискретизации по дальности;
- сохранять когерентную структуру сигнала;
- получать новую радиоголограмму, пригодную для обработки штатным алгоритмом перспективной системы.

Результаты моделирования для точечных целей показали хорошую точность: положение откликов сохраняется в пределах 1-2 пикселей, уровень боковых лепестков соответствует теоретическому. Метод может быть использован для реализации алгоритмов обработки новых РСА до начала летных испытаний, что сокращает затраты и время разработки.

В докладе также приводятся результаты синтеза РЛИ<sub>1</sub> при:

- изменении порога обработки РЛИ<sub>0</sub>;
- изменении высоты орбиты и угла визирования;
- изменении длительности зондирующих импульсов;
- применении оконных функций;
- моделировании групповых и распределенных целей.

## **Литература**

1. Franceschetti G., Lanari R. Synthetic aperture radar processing. – CRC press, 2018.
2. Доросинский Л.Г. Обработка радиолокационных изображений: монография / Л.Г. Доросинский, Н.С. Виноградова, О.Ю. Иванов. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2021. – 334 с. – ISBN 978-5-91327-714-5. – DOI 10.17513/np.503.
3. Plant W. J. A stochastic, multiscale model of microwave backscatter from the ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2002. – Т. 107. – №. С9. – С. 3-1-3-21.
4. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / М.А. Басараб, В.К. Волосяк, О.В. Горячкин [и др.]. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 544 с. – ISBN 978-5-9221-0871-3.
5. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
6. Тараскин Д.А. Частотный метод передискретизации и масштабирования разрешения радиолокационных изображений космического базирования // XVIII Всероссийская молодежная научная конференция «Зворыкинские чтения - 2026»: сборник тезисов докладов. – Муром: МИ ВлГУ, 2026. – 617 с.: ил. – [Электронный ресурс]