

## **Разработка программного комплекса для моделирования радиоголограмм от радиолокаторов с синтезированной апертурой**

М.С. Смирнов, В.В. Костров, В.А. Пальманов

*Муромский институт Владимирского государственного университета  
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых  
E-mail: smirnov.murom@gmail.com*

*В работе представлены результаты разработки программного комплекса, предназначенного для расчета геометрических и временных характеристик космического аппарата, для моделирования процесса формирования радиоголограммы и для синтеза радиолокационного изображения (РЛИ) в различных режимах съемки.*

*In this paper discussed results of software development for SAR modeling. Software is designed for calculating geometric and time parameters of space sensor platform, for modeling raw data from SAR, and for conversion raw SAR data to processed radar image.*

### **Введение**

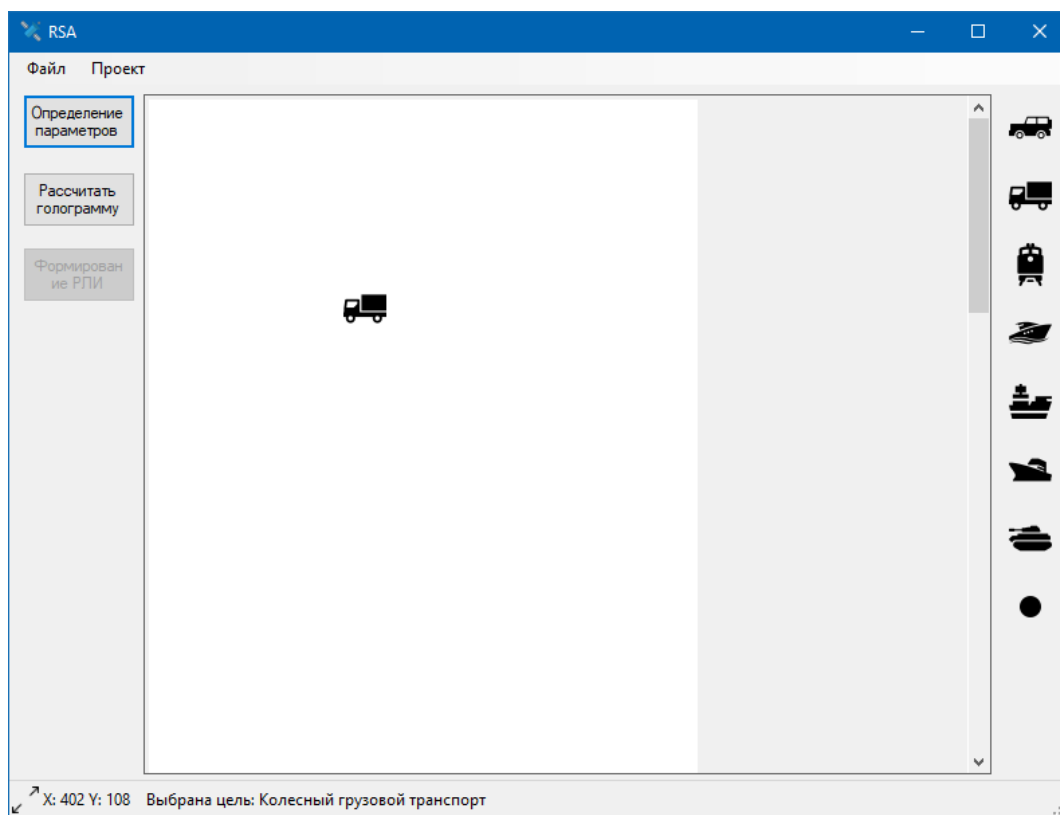
Постановка многократных физических экспериментов связана с запусками космических аппаратов и является дорогостоящей, что делает востребованным создание адекватных математических моделей радиоголограмм. К настоящему времени технология моделирования радиоголограмм достаточно хорошо отработана для поверхности моря и неподвижных точечных целей. Однако даже в этом случае модели, как правило, не учитывают скорость и направление движения волн, распространение кильватерного следа от движущихся надводных объектов. Отсутствуют методики моделирования движущихся целей с учетом их объема и наличия подвижных частей, которые имеют отличающиеся от носителя параметры движения. Все это приводит к низкой точности моделирования, снижению адекватности модельных РЛИ реально получаемым. Как следствие, в алгоритмах обработки радиоголограмм систем радиовидения при выделении сигналов движущихся целей недостаточно полно учитываются дополнительные возможности подавления окружающего фона и подстилающей поверхности, что приводит к снижению качества обнаружения, оценивания координат и скорости движущихся целей, росту потока ложных тревог. Также в полноценном доступе отсутствуют программные продукты, способные проводить синтез радиоголограмм с учетом различных подстилающих поверхностей и наличия движущихся объектов.

### **Описание интерфейса программного комплекса**

Разрабатываемый программный комплекс предназначен для формирования радиоголограммы с учетом различных подстилающих поверхностей. Общий интерфейс программы представлен на рис. 1. Для формирования радиоголограммы необходимо определить входные параметры сцены такие как:

- базовый режим съемки (маршрутный, сканирующий прожекторный);
- тип подстилающей поверхности (абсолютно черная поверхность, штилевая морская поверхность, морская поверхность с волнением, береговая линия, лесной массив, зимняя степь; летняя степь, железнодорожное полотно, взлетно-посадочная полоса, пустыня);
- высота орбиты космического аппарата;
- угол и пределы визирования;
- длина волны;

- тип поляризации сигнала;
- азимутальное и угломестное разрешение;
- ширина ДНА по в азимутальной и угломестной плоскости.



**Рис. 1. Общий интерфейс программы моделирования радиоголограммы**

В настоящий момент возможности программного комплекса сводятся к трем основным пунктам: расчёт временных и геометрических параметров, расчёт комплексной радиоголограммы и формирование радиолокационного изображения на основе рассчитанной радиоголограммы. Данные действия должны выполняться последовательно друг за другом, что обеспечивается средствами программы, последовательно дающей доступ к соответствующим разделам.

Блок «определение параметров» выполняет расчет геометрических и временных параметров[1]. Результаты расчета используются как для визуального контроля формирования сцены (рис. 2), так и в качестве опорных данных для формирования радиоголограммы.

Для расчёта радиоголограммы помимо исходных параметров сцены и рассчитанных временных и геометрических параметров, можно задавать модели одного или нескольких подвижных объектов. В качестве модельных объектов в программе используются следующие классы объектов: точечный объект, колесный легковой транспорт, колесный грузовой транспорт, гусеничная тяжелая техника, железнодорожный транспорт, малые морские суда, средние морские суда, крупные морские суда.

При формировании отражающих поверхностей объектов учитывается размер объекта и ракурс наблюдения. Размер объекта задается ее классом.

Параметр	Значение
Критический угол визирования	1,18694813150488
Наклонная дальность	737326,925214586
Скорость КА	7591,01001513969
Скорость подспутниковой точки, m/s	7038,61516612647
Шаг движения по азимутальной координате	0,655560519959701
Дискрет по наклонной дальности	3,60567828107992
Время синтеза	0,289660991836831
Ширина следа луча ДНА по azimuth, м	9265,75861667672
Ширина следа луча ДНА по elevation, м	12054,0176864258
Период следования импульсов	8,63601179095056E-05
Число отсчетов в импульсе после дискретизац...	207
Скорость нарастания ПЧМ	34827503000715
Длительность зондирующего импульса	5E-06
Число импульсов до начала зондирования	0
Частота (МГц) квантования сигнала с шириной ...	41572269,435837

Рис. 2. Окно результатов расчета геометрических и временных параметров

Ракурс объекта определяется положением космического аппарата относительно объекта. Поскольку объект является трехмерным, то при формировании значений отражающей поверхности строится проекция объекта на двумерную карту. Проекция объекта строится исходя из конфигурации цели, высоты орбиты космического аппарата и угла визирования (рис. 3).

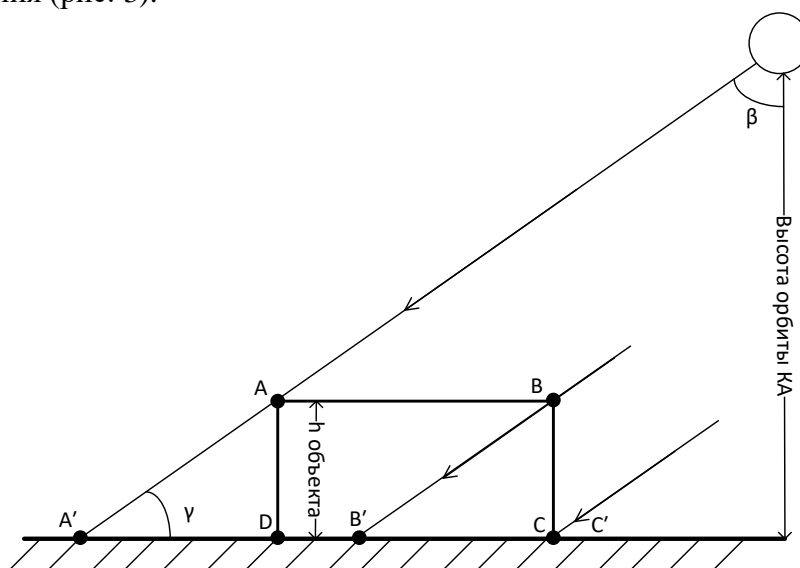


Рис. 3. Проецирование точек объекта на плоскость подстилающей поверхности

При проецировании точек объекта на плоскость подстилающей поверхности принимается, что все падающие лучи идут параллельно друг другу. Таким образом, координата проекции точки A на плоскости (точка A') будет отстоять от координаты самой точки, на расстояние определяемой выражением:

$$A'D = \frac{AD}{\operatorname{tg} \gamma}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  - угол скольжения. Поскольку AD – это высота объекта, то выражение можно переписать в виде:

$$A'D = \frac{h_{\text{объекта}}}{\text{tg}\gamma}, \quad (2)$$

Координата проекции точки В на плоскости подстилающей поверхности (точка В') также будет отстоять от координаты самой точки на расстояние, определяемое выражением (2). Координата проекции точки С на плоскости подстилающей поверхности (точка С') совпадает с координатами самой точки. Точка D при данном ракурсе объекта не «видна» для лучей космического аппарата и не учитывается в проекции.

Угол скольжения рассчитывается исходя из высоты космического аппарата и угла визирования ( $\beta$ ) согласно выражению:

$$\gamma = \arccos\left(1 + \frac{H_{КА}}{R_3}\right) \cdot \sin \beta. \quad (3)$$

При формировании координат точек объекта необходимо учитывать разрешающую способность РСА по азимутальной и угломестной координате. Количество точек объекта по азимутальной или угломестной координате определяется как отношение соответствующего размер объекта к соответствующему значению разрешающей способности. Количество точек по азимуту рассчитывается как:

$$N_{az} = \left\lceil \frac{L}{R_{az}} \right\rceil. \quad (4)$$

где  $L$  – длина объекта в азимутальном направлении,  $R_{az}$  – разрешающая способность по азимуту.

Количество точек по дальности рассчитывается как:

$$N_{ум} = \left\lceil \frac{W_{ум}}{R_{ум}} \right\rceil. \quad (5)$$

где  $W_{ум}$  – длина объекта в угломестной плоскости,  $R_{ум}$  – разрешающая способность по дальности.

Длина объекта в угломестной плоскости рассчитывается с учетом режима съемки, поскольку эта величина зависит от угла визирования и углов ориентации цели. Для нормального бокового обзора  $W_{ум} = W \cdot \sin \beta$ , где  $W$  – длина объекта в наземной проекции.

После определения количества точек формируется массив координат точек объекта. Начальные координаты ( $x_0$ ,  $y_0$ ) определяют левый нижний угол объекта. Координаты правого верхнего угла определяются как  $x_0 + N_{az}$ ,  $y_0 + N_{ум}$ .

После определения координат осуществляется поворот объекта на угол, соответствующий ракурсу. Для этого используются аффинные преобразования фигуры. С аналитической точки зрения преобразования – это пересчет значений координат. Заметим, что аналогичные преобразования используются для разложения вектора скорости движения цели и внесения доплеровских поправок в модель траекторного сигнала.

Алгоритмы расчета радиоголограммы приведены в [2]. Результат расчета радиоголограммы можно сохранить как в графическом (BMP) формате, где каждый пиксель изображения является действительной частью комплексной радиоголограммы, так и в формате CEOS [3], для дальнейшей обработки сторонними программными продуктами.

Сформированная радиоголограмма может служить основой для формирования радиолокационного изображения [4], которое в свою очередь может быть сохранено, как в графическом (BMP) формате, где каждый пиксель изображения является пикселем амплитудного или яркостного РЛИ, так и в формате CEOS для дальнейшей обработки сторонними программными средствами. Примеры формирования радиоголограммы для абсолютно черной поверхности, с двумя объектами представлены на рис. 4.

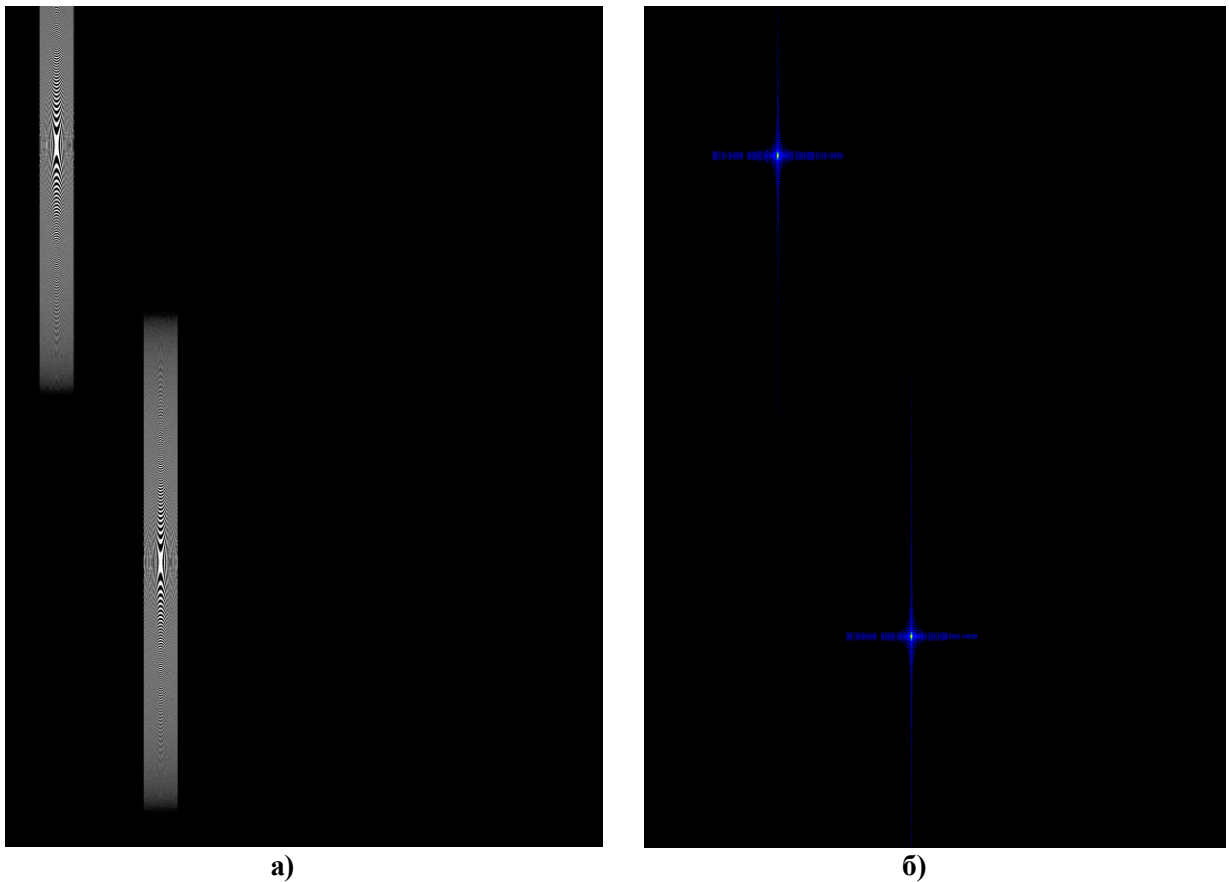


Рис. 4. Результат работы программного комплекса: а) – радиоголограмма, б) – отзумленное радиолокационное изображение

#### **Выводы**

Разрабатываемый комплекс успешно реализует моделирование процесса формирования радиоголограммы РСА на основе сцен с различной подстилающей поверхностью. Также реализована возможность добавления на сцену подвижных объектов на основе блестящих точек. В программе есть возможность сохранения комплексной радиоголограммы и радиолокационного изображения, как в графическом формате, так и в буквенно-цифровом виде в формате CEOS.

#### **Литература**

1. Храмов К.К., Костров В.В., Смирнов М.С. Расчет геометрических параметров радиолокационной съемки с помощью РСА космического базирования для

программного комплекса формирования радиоголограммы // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. XII Всероссийские научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всероссийской межвузовской научной конференции [Электронный ресурс]. Муром, 7 февр. 2020 г. – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2020. – С.89-90.

2. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.

3. SAR data Products Format Standards Issue / rev: 2.0 10 March 1989.

4. Prats-Iraola P., Scheiber R., Rodriguez-Cassola M., Mittermayer J., Wollstadt S., De Zan F., Brautigam B., Schwerdt M., Reigber A., Moreira A. On the Processing of Very High-Resolution Spaceborne SAR Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014. Vol.52. No.10. Pp.6003-6016.