

## **Формирование точечных моделей объектов по комплексным РСА-изображениям**

**Л.Б. Неронский, В.С. Верба, С.Г. Лиханский, И.Г. Осипов,  
С.Н. Пущинский, В.Э. Турук**

*ОАО «Концерн «Вега»,  
121170 Москва, Кутузовский просп. 34  
E-mails: mail@vega.su*

Предложена процедура формирования точечных моделей объектов по их комплексным радиолокационным изображениям. Рассмотрена структурная схема обработки на примере кораблей, с отражением, типичным для постоянных отражателей.

**Ключевые слова:** РСА, обработка радиолокационных изображений

### **Введение**

В последние годы большой интерес уделяется получению радиолокационных изображений объектов, характеризующихся как постоянные отражатели (Permanent Scatterers – PS), которые формируют на радиолокационном изображении (РЛИ) отклики постоянной интенсивности, практически не имеющие флюктуаций при вариации условий наблюдения – ракурса и угла места, по крайней мере, в ограниченных пределах (до 10...20°) относительно исходного направления. К таким объектам относятся, например, кромки зданий, а также уголкового отражатели, используемые как опорные ориентиры для привязки изображений объектов к координатам на местности [1]. Особый случай имеют отражения от кораблей, для которых характерно наличие доминантных центров отражения формируемых надстройками корабля и другими элементами конструкций, которые в зависимости от разрешающей способности РСА могут давать отдельные, близкие импульсному отклику РСА отметки, либо результат их интерференции в элементе разрешения РСА.

В ряде прикладных задач, например, в задачах распознавания объектов по их радиолокационным портретам, используют процедуры сравнения полученных изображений объектов с эталонными РЛИ, соответствующими ожидаемым классам объектов. Для формирования эталонных радиолокационных портретов удобно использовать банки радиолокационных данных, представленные в виде набора точечных отражателей, соответствующих трехмерной конфигурации объекта.

Основой для составления банка данных могут служить чертежи, фотографические снимки прототипов объектов наблюдения, а также наборы радиолокационных снимков, полученных с помощью РСА высокого разрешения с применением интерферометрической обработки для получения 3-D портретов или методов обратного синтеза (Inverse SAR) [1, 2].

Продуктивным методом является набор материалов для составления представительного банка данных в рабочих режимах РСА после ввода аппаратуры в эксплуатацию с уточнением данных о типе объекта, например, по космическим оптическим снимкам мест стоянки. Сложность использования РЛИ рабочих режимов для пополнения банка данных точечными моделями связана с отсутствием запаса по разрешающей способности исходных РЛИ.

Цель работы состоит в рассмотрении процедуры преобразования РЛИ в набор точечных отражателей, которые, будучи пропущены через двумерный фильтр с частотной характеристикой, совпадающей со сквозной характеристикой РСА, аппроксимируют получаемое радиолокатором РЛИ. Естественно, что такой набор будет пригоден и для моделирования РЛИ объекта в РСА с худшим пространственным разрешением.

Применение для этих целей оператора деконволюции неэффективно, так как приводит к резкому возрастанию шумов. Предложена процедура компактного представления радиолокационных портретов объектов, содержащих постоянные отражатели (ПО). Назовем ее процедурой «скелетизации».

### Процедура «скелетизации» радиолокационного портрета объекта

#### *Особенности радиолокационных изображений от постоянных отражателей*

Под постоянным отражателем будем понимать фрагмент объекта (доминантный центр отражения), для которого основной вклад в отраженный сигнал определяется одиночным точечным отражателем. Комплексное РЛИ от такого фрагмента формируется суммой сигналов от точечного отражателя, от совокупности мелких отражателей, попадающих в рассматриваемый элемент разрешения РЛИ и составляющих теплового шума

$$\dot{U} = U_{PS} e^{j\varphi_{PS}} + \sum_k u_k e^{j\varphi_k} + \sum_q u_{nq} e^{j\varphi_{nq}} \quad (1)$$

где  $U_{PS}$ ,  $\varphi_{PS}$  – амплитуда и фаза сигнала, отраженного от ПО,  $u_k$ , и  $\varphi_k$ ,  $u_{nq}$  и  $\varphi_{nq}$  – амплитуды и фазы сигналов от случайных малых отражателей и составляющих шумов соответственно. При этом

$$U_{PS}^2 \gg \sum_k u_k^2 + \sum_q u_{nq}^2 . \quad (2)$$

Для откликов от ПО характерны следующие особенности:

- комплексный отклик в пикселях РЛИ соседних с максимумом амплитуды от ПО близок к функции импульсного отклика РСА;
- амплитуда сигнала в пикселе с ПО распределена по закону Райса, а действительная и мнимая составляющие имеют Гауссово распределение со средними значениями, определяемыми составляющими ПО;
- при синтезе РЛИ путем разделения полной длительности сигнала на субапертуры (как при фильтрации спекл-шума методом Multilook) отклик расширяется, но положение его остается стабильным для всех парциальных РЛИ;
- при дефокусировке РЛИ отклик от ПО расширяется (рисунок 1, а) в отличие от наблюдения поверхности с диффузным отражением (рисунок 1, б), для которой автокорреляционная функция сигнала определяется только шириной его спектра без учета закона изменения фазы [3].

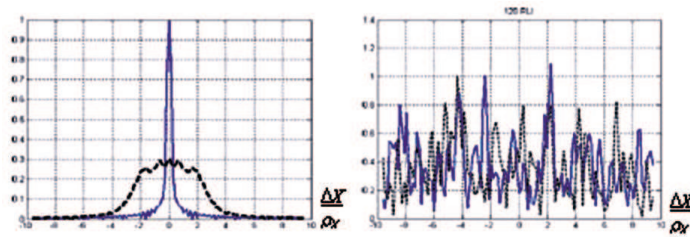


Рис. 1. Отклики РСА от точечной цели а) и фона местности б) для фокусированного синтеза (сплошная линия) и ошибки фокусирования (пунктир)

На рисунке 2 приведены яркостный и рельефный радиолокационные портреты морского судна (предположительно, порожний сухогруз). Кроме нескольких доминантных отражателей на корме имеем близкую к точечным отражателям разреженную структуру по кромке палубы.

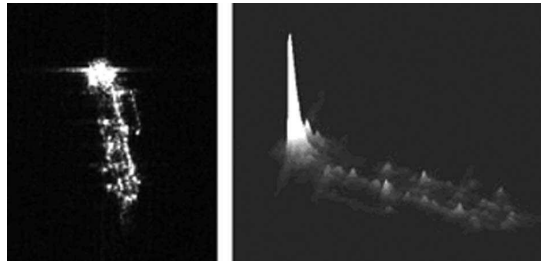


Рис. 2. Яркостный а) и рельефный б) радиолокационные портреты судна. РСА «Компакт», X-диапазон, разрешение 3,5 м [4]

### Структурная схема процедуры «скелетизации»

Принцип вычисления точечной модели объекта по его КРЛИ основан на близости отклика от ПО к импульсной реакции РСА. Физическая интерпретация этой процедуры состоит в установке на объекте наблюдения виртуальных точечных отражателей (транспондеров), формирующих сигнал, компенсирующий отражение от каждого из ПО. Такой подход сохраняет линейность системы с возможностью корректного использования алгоритмов фильтрации сигналов.

Исходным материалом является комплексное РЛИ SLC (*Single Look Complex*). Структурная схема процедуры «скелетизации» приведена на рисунке 3.

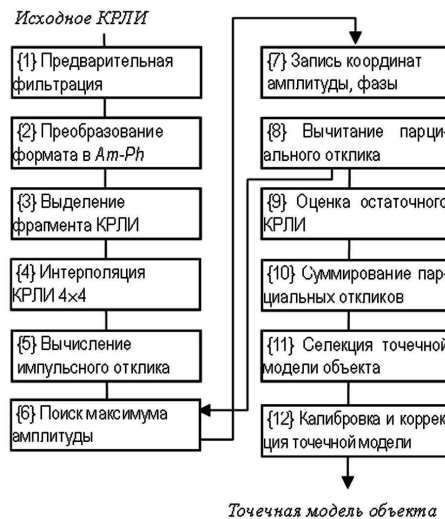


Рис. 3. Структурная схема процедуры «скелетизации»

Первая операция {1} предусматривает фильтрацию КРЛИ для получения монотонной функции импульсного отклика и исключения артефактов в виде «крестов» (верхняя часть рисунка 2, б). Используют двумерную амплитудную взвешивающую функцию, которая приближает спектр сигнала к усеченному Гауссову закону. Далее {2} для удобства работы преобразуем исходное изображение в целые форматы GeoTIFF 16 и 8 разрядов для амплитуды ( $A16$  и  $A8$ ) и 16 разрядов для фазы ( $Ph16$ ).

На исходном РЛИ ( $A8$ ) находим фрагмент, содержащий анализируемый объект, и вырезаем его с запасом (обнуляемым) на ширину импульсной реакции, получая фрагменты КРЛИ {3} для последующей обработки. Интерполируем КРЛИ с увеличением  $44$  м методом «раздвижки спектра» (*Zero Padding*).

По спектру сигнала вычисляем форму импульсного отклика  $h(m, n)$  с нормировкой максимального значения равного 1. Здесь  $m$  – номера пикселей по наклонной дальности,  $n$  – по азимуту симметрично относительно нуля. Мнимая составляющая несмещенного отклика должна быть равна нулю. В противном случае (ошибка фокусирования) применяем локальную автофокусировку методом, изложенным в [5].

Далее выполняется цикл итеративных операций {6}–{8} для получения точечных моделей. В цикл входят:

- поиск координат максимума амплитуды по наклонной дальности и азимуту, запись их для компенсирующего виртуального точечного отражателя (ТО), а также амплитуды и фазы, совпадающих с локальным максимумом РЛИ. Корректировка этих параметров при необходимости возможна на последнем этапе обработки);

- вычитание из КРЛИ двумерного компенсирующего сигнала от  $i$ -го ТО  $\dot{U}_i(m_i, n_i)$

$$\dot{U}_{i+1}(m, n) = \dot{U}_i(m, n) - \dot{U}(m_i, n_i) \cdot h(m - m_i, n - n_i), \quad (3)$$

где  $m_i, n_i$  – номера пикселей для  $i$ -го локального максимума,  $m, n$  – номера пикселей фрагмента КРЛИ.

В ходе итераций периодически проводится оценка остаточного КРЛИ и сравнение его с уровнем шумов или окружающего фона {9}. При достаточном числе итераций вычисляется сумма парциальных компенсирующих сигналов, в которой содержится точечная модель (ТМ) объекта {10}

$$\dot{U}_{PS} = \sum_i \dot{U}_i(m_i, n_i). \quad (4)$$

Полезно оценивать отношение дисперсии к квадрату средней амплитуды и ее отличие от 1 (экспоненциальное распределение квадрата гауссова процесса).

$$\frac{\sigma_{sq}}{M_1} = \frac{\sqrt{M_1 \{ \dot{U}_{last}^2(m, n) \} - M_1 \{ \dot{U}_{last}(m, n) \}^2}}{M_1 \{ \dot{U}_{last}(m, n) \}}. \quad (5)$$

Сходимость остаточного КРЛИ к диффузному нормальному процессу демонстрирует рисунок 4.

Для селекции ТО, принадлежащих требуемому объекту {11}, используем маску, полученную на основе амплитудного РЛИ в формате  $A8$  путем пороговой обработки или применением программы обработки растровых изображений.

Заключительная операция {12} заключается в калибровке ТМ по данным калибровки РСА, а также ее коррекции с преобразованием из 2-D формата в 3-D модель на основе анализа полученного радиолокационного портрета (РЛП) или имеющейся дополнительной информации (интерферометрическая обработка, чертежи, фотоснимки и др.).

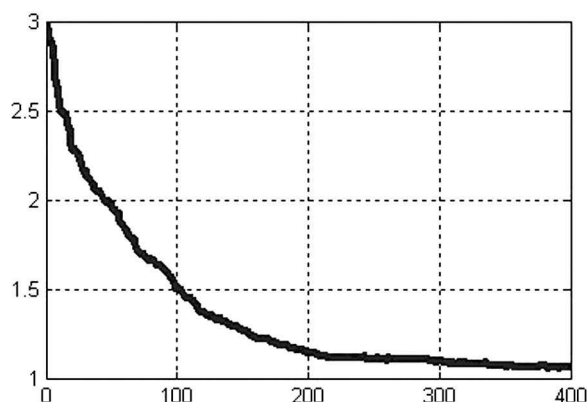


Рис. 4. Зависимость отношения  $\sigma_{sd}/M_1$  от числа итераций с выделением ТО

На рисунке 5 дается иллюстрация последовательности операций по формированию точечных моделей радиолокационных портретов кораблей, полученных в процессе эксплуатации РСА «Меч-КУ» (ЭКОР-1А) космического аппарата «Алмаз-1» [6]. Представлены исходные амплитудное и фазовое РЛИ (*a*, *b*) стоянки кораблей после операций {1}–{4}, маска (*в*) для выделения заданного объекта и полученная ТМ радиолокационного портрета корабля (*г*) в координатах наклонная дальность *R*, азимут *X*.

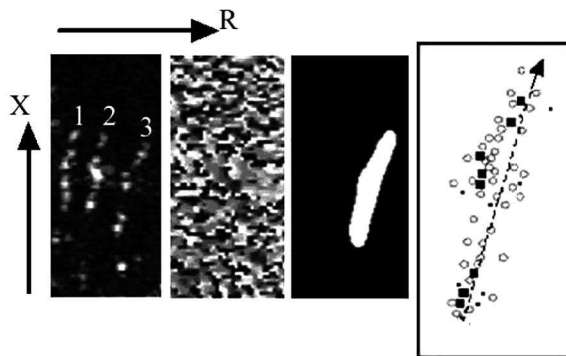


Рис. 5. Последовательность выполнения процедуры «скелетизации»: *a* – исходное РЛИ в формате А8 – стоянка кораблей (1, 3 – класс «Kresta», 2 – класс «Grisha» [7]). В нижней части видны элементы причала; *b* – фазовое изображение (Ph16); *в* – маска для выделения объекта 3; *г* – точечная модель корабля 3

Измеренная суммарная ЭПР корабля (3) составляет  $7360 \text{ м}^2$ , максимальная ЭПР ПО  $820 \text{ м}^2$ , уровни ЭПР на рисунке (*г*): «■» – выше  $200 \text{ м}^2$ , «○» –  $50 \text{ м}^2$ , «●» –  $12 \text{ м}^2$ . Пунктирной линией со стрелкой на ТМ показана продольная ось корабля

Отношение мощности максимальной отметки к среднему уровню отражения от морской поверхности составляет 25 дБ. Исходная разрешающая способность снимков 8 м по азимуту и 9 м по наклонной дальности. Угол падения  $\sim 40^\circ$ .

С учетом масштаба интерполированного снимка 1,2 м длина корабля примерно равна 140 м. По величине отклонения отметок по наклонной дальности от продольной оси корабля можно оценить высоту надстроек — около 15 м.

## Анализ результатов обработки КРЛИ объектов

Анализ материалов обработки КРЛИ показывает эффективность использования предложенной методики для каталогизации РЛ портретов объектов с характерным для ПО отражением. Применительно к морским судам легко реализуется разделение отражающих элементов на сосредоточенные и диффузные. На рисунке 5 показаны результаты дополнительной обработки представленных данных: РЛП, восстановленный по точечной модели (только ПО), сочетание ТМ и диффузной составляющей синфазной с ближайшим ТО, а также диффузная составляющая, смещенная по фазе относительно ТО на  $\pi/2$ . Эти составляющие вычислялись по формуле

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\text{Re}}(m, n) &= \text{Re}\{\dot{U}(m, n) \cdot \exp(-\varphi_{PM}(m, n))\}, \\ \dot{U}_{\text{Im}}(m, n) &= \text{Im}\{\dot{U}(m, n) \cdot \exp(-\varphi_{PM}(m, n))\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\dot{U}(m, n)$  – исходное КРЛИ,  $\varphi_{PM}(m, n)$  – фаза КРЛИ, восстановленного по совокупности ТМ фрагмента КРЛИ.

Приведено также значение фазы КРЛИ, скорректированного по ТМ  $\dot{U}(m, n) = \dot{U}_{\text{Re}}(m, n) + j \cdot \dot{U}_{\text{Im}}(m, n)$

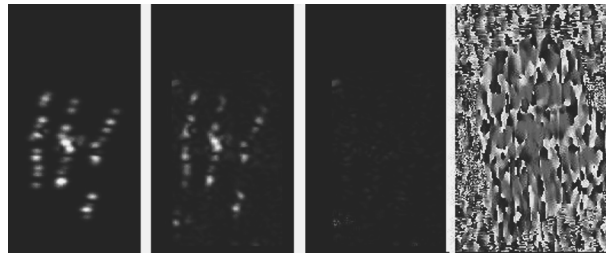


Рис. 6. Составляющие РЛ портрета корабля: а – восстановленный по ТМ, б и в – действительная и мнимая части КРЛИ, скорректированного по фазе ТМ; г – фаза скорректированного КРЛИ

Средний уровень диффузных составляющих, измеренных по мнимой части скорректированного КРЛИ, достаточно высок — около минус 10 дБ относительно максимальной отметки (и на 15 дБ выше отражения от моря). На фазовом изображении четко выделяется область высокой корреляции, обусловленная ПМ.

Проверка остаточного РЛИ путем расфокусировки подтверждает малый вклад и случайность его составляющих (аналогично рисунку 1, б). Применение предложенной процедуры для выделения точечных отражателей на КРЛИ городской застройки показывает ее пригодность и для таких объектов [8].

## Заключение

Предложена процедура обработки комплексных радиолокационных изображений, представлять радиолокационные портреты объектов в виде компактного набора точечных моделей. Процедура может найти применение при формировании банков радиолокационных данных используемых в задачах распознавания объектов, имеющих характеристики близкие к постоянным отражателям.

## Литература

1. *Touzi R., Raney R.K., Charbonneau F.* On the Use of Permanent Symmetric Scatterers for Ship Characterization // *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing.* – 2004, vol.42, no.10, pp.2039-2045.
2. *Chong J., Zhu M., Dong G.* Ship Target Segmentation of High Resolution SAR Images // *Proc. EU-SAR'2002, Cologne, Germany.* – June 4–6, 2002, pp.693-696.
3. *Неронский Л.Б.* Оценка разрешающей способности РЛС с синтезированной антенной по переходным функциям и интервалу корреляции выходного сигнала // *Радиотехника и электроника.* – 1975, №2. – С.271-279.
4. *Внотченко С.Л., Достовалов М.Ю., Ермаков Р.В.* и др. Сравнительный анализ радиолокационных характеристик отражения объектов и фоновых поверхностей в X, L и УКВ диапазонах. инфраструктуры // VI открытая Всероссийская конференция. «Современные проблемы дистанционного зондирования из космоса». Тезисы докладов. – М.: ИКИ РАН, 10–14 ноября 2008 .
5. *Neronskiy L.B., Verba V.S., Osipov I.G., Pushkov D.V.* PGA Algorithm Application for Local Autofocusing of Hi-Res Spaceborne SAR Images // *Proc. EUSAR'2008, Friedrichshaffen, Germany.* – June 2–5, 2008, vol.2, pp.101–104.
6. *Verba V., Neronskiy L., Osipov I.* Russian Spaceborne Imaging Radars: Scientific and Technical Achievements // *Proceedings of XXVIIth General Assembly of International Union Radin Science (URSI), New Dehli, India.* – Oct 23–29, 2005.
7. *Jane's Fighting Ships 1990-1991.* Richard Sharpe. Janes Yearbook. 1990, 800 pp.
8. *Hounam D., Moreira A., Mittermayer J., Kriger G., Small A.* Low-Cost SAR Satellite for InSAR Measurements of Permanent Scatterers // *Proceedings 5th European conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR'2004), Ulm, Germany.* – May 25–27, 2004, pp.49-52.

## Generation of Object Point Models by SAR Complex Images

**L.B. Neronskiy, V.S. Verba, S.G. Lihansky, I.G. Osipov,  
S. N. Pushchinskiy, V.E. Turuk**

*JSC «Radio Engineering Corporation«Vega»,  
34, Kutuzov ave., Moscow 121170, Russia  
E-mails: mail@vega.su*

The procedure is offered to generate object point models by their complex radar images. The processing block-diagram is considered by the example of ships patterns with reflection typical for permanent scatterers.

**Keywords:** SAR, SAR image processing.