

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.3.5>

УДК: 621.396.969.3:004.032.26

МОДЕЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОРТРЕТОВ (СИГНАТУР) МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Е.Э. Филиппских, А.В. Попов, Ф.А. Галкин, С.В. Морозов

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

Статья поступила в редакцию 4 марта 2022 г.

Аннотация. В статье приводится описание предложенной авторами методики расчета радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов сложной пространственной конфигурации на основе цифровых пространственных (трехмерных) моделей их описания в приближении методов геометрической оптики. Разработанная модельно-ориентированная методика предназначена для расчета разноракурсных радиолокационных портретов квазистационарных объектов, к которым относятся различные виды наземной, авиационной и морской техники, на фоне подстилающей поверхности применительно к заданным параметрам и условиям радиолокационного наблюдения земной поверхности. Отличительной особенностью при реализации данной методики является возможность оперативного получения радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов сложной формы со степенью адекватности и в объемах, обеспечивающих автоматизацию обработки натуральных радиолокационных изображений на основе технологий искусственного интеллекта (ИИ), в том числе при поддержке специализированных банков эталонных радиолокационных данных, сформированных на их основе.

Ключевые слова: методика, радиолокационное изображение, портрет, сигнатура, объект сложной пространственной конфигурации, радиолокационный датчик, цифровая пространственная модель местности, эффективная площадь рассеяния, локальный центр рассеяния.

Abstract. The article describes the method proposed by the authors for forming radar portraits (signatures) of objects of complex spatial configuration with a conductive surface based on digital spatial (three-dimensional) models of their description in approximation of geometric optics methods. The developed model-oriented technique is intended for calculation of multiple radar portraits of quasi-stationary objects, which include various types of ground, aviation and marine equipment, against the background of underlying surface in relation to the specified parameters and conditions of radar observation of the earth 's surface. A distinctive feature in the implementation of this technique is the possibility of prompt obtaining of radar portraits (signatures) of metal objects of complex shape with the degree of adequacy and in volumes providing automation of processing of natural radar images on the basis of artificial intelligence technologies, including with support of specialized banks of reference radar data formed on their basis.

Key words: technique, radar photograph, portrait, signature, complex object, radar sensor, digital 3d terrain model, effective scattering area, local center of scattering.

Автор для переписки: Филиппских Евгений Эдуардович, phil_ml@list.ru

Введение

Наиболее трудными и ресурсоемкими при обработке больших потоков радиолокационных данных, получаемых современными воздушными и космическими средствами дистанционного зондирования земли, является процедуры обнаружения, селекции и классификации объектов заданных типов (классов) на фоне подстилающей поверхности, в том числе в условиях сложной помеховой обстановки [1].

Следовательно, повышение степени автоматизации комплексной обработки радиолокационных данных, особенно на этапах обнаружения и распознавания объектов наземной, авиационной и морской техники, является в настоящее время важной и актуальной задачей. Одним из перспективных направлений ее решения является реализация процессов обработки радиолокационных изображений (РЛИ) с использованием методов и технологий искусственного интеллекта (например, на основе нейронных сетей).

Для эффективного функционирования таких систем обработки необходимо наличие предварительно сформированной представительной обучающей выборки радиолокационных портретов (сигнатур) типовых объектов, имеющих, как правило, проводящую (металлическую) поверхность сложной геометрической формы. Под радиолокационным портретом (сигнатурой) объекта понимается совокупность локальных центров рассеяния (ЛЦР), описывающих его наиболее информативные и устойчивые признаки в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне, а также по форме, размеру и взаимному положению которых обеспечивается принятие решения о его принадлежности к тому или иному классу (типу).

Важными условиями, определяющими полноту и качество автоматизированной обработки РЛИ, в этом случае являются достоверность и своевременность подготовки эталонных радиолокационных портретов (сигнатур) объектов применительно ко всем возможным (прогнозируемым) условиям их наблюдения.

В качестве основы для формирования специализированных банков данных, содержащих эталонные радиолокационные портреты (сигнатуры) объектов, могут использоваться натурные РЛИ рассматриваемых объектов на фоне подстилающей поверхности, полученные экспериментальным путем.

Однако данный способ требует наличия и привлечения большого количества сил и материально-технических ресурсов при получении экспериментальных радиолокационных данных в требуемых объемах с априорными знаниями характеристик наблюдаемой сцены, что на практике

зачастую является затруднительным. Кроме того, не всегда представляется возможным получение экспериментальных радиолокационных данных по всей номенклатуре объектов для всех возможных условий их наблюдения и параметров функционирования радиолокационных датчиков.

В этом случае становится целесообразным использование методов математического моделирования радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов сложной пространственной конфигурации. Для этих целей широко применяются аналитические методы и методы дифракции электромагнитных волн на телах сложной формы совместно с методами вычислительной электродинамики [2].

Проблема анализа электромагнитных полей, отраженных от металлических объектов сложной геометрической формы, связана с решением задачи дифракции электромагнитной волны на объекте с привлечением сложного и громоздкого математического аппарата методов физической оптики, физической теории дифракции и краевых волн [3, 4]. Также существуют менее ресурсоемкие точные аналитические методы расчета рассеяния электромагнитных волн на различных примитивах [5] и менее точные вычислительные методы, среди которых отдельно можно выделить методы геометрической оптики [6].

В этой связи предлагается использовать методику, реализующую модельно-ориентированный подход к расчету радиолокационных портретов (сигнатур) объектов сложной пространственной конфигурации с проводящей поверхностью в приближении геометрической оптики в комбинации с методами физической оптики. За счет этого обеспечивается моделирование различных типов радиолокационных датчиков на основе процедуры трассировки лучами цифровых пространственных моделей местности, содержащих описание металлических объектов [7], а также расчет значений ЭПР фрагментов поверхности этих объектов в пределах каждого элемента разрешения с использованием аналитических выражений физической оптики для плоской проводящей пластины конечных размеров [5].

Предлагаемая методика обеспечивает оперативное формирование достоверных разноракурсных радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов сложной пространственной конфигурации на фоне подстилающей поверхности в интересах обеспечения решения задач повышения эффективности автоматизированного обнаружения и распознавания объектов на основе ограниченных наборов их устойчивых отличительных признаков (характерных распределений локальных центров рассеяния) в СВЧ-диапазоне спектра.

1. Сущность и содержание модельно-ориентированной методики расчета радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов

В основу разработанной модельно-ориентированной методики расчета радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов положен принцип расчета радиолокационных изображений на основе цифровых пространственных (трехмерных) моделей местности (ЦПММ) в приближении геометрической оптики [8, 9].

Использование ЦПММ обеспечивает задание, как пространственных характеристик моделируемой сцены с объектами, так и электрофизических свойств поверхностей ее составных элементов.

На рис. 1 показан пример комплексной ЦПММ, содержащей в своем составе цифровые пространственные модели описания естественных фоновых образований растительного происхождения (луг, лес), типовых искусственных объектов с непроводящими поверхностями (бетон, асфальт), а также бронетанковой техники различных типов (танки, бронетранспортеры и др.), относящейся к металлическим объектам сложной пространственной конфигурации с проводящей (металлической) поверхностью.

Использование базы данных отражательных характеристик (БД ОХ) обеспечивает получение значений удельных эффективных площадей рассеяния (УЭПР) для различных типов непроводящих поверхностей с учетом условий наблюдения (угла визирования), параметров моделируемого радиолокационного

датчика (длины волны, типа поляризации зондирующего сигнала), метеоусловий и времени года [10–12].



Рис. 1. Пример комплексной цифровой пространственной модели местности, содержащей модели описания бронетанковой техники

Пример графика регрессионной зависимости среднего значения УЭПР прикатанной пашни от длины волны зондирующего сигнала λ при фиксированных значениях угла наблюдения Q , среднеквадратического отклонения высот неровностей dh и влажности поверхности m показан на рис. 2.

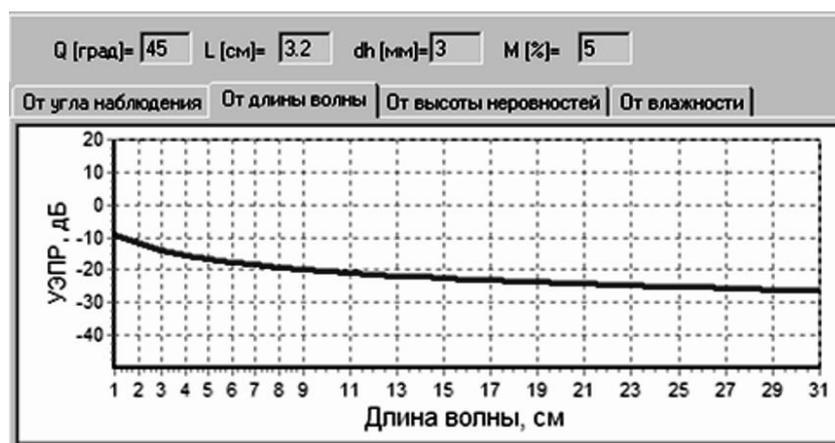
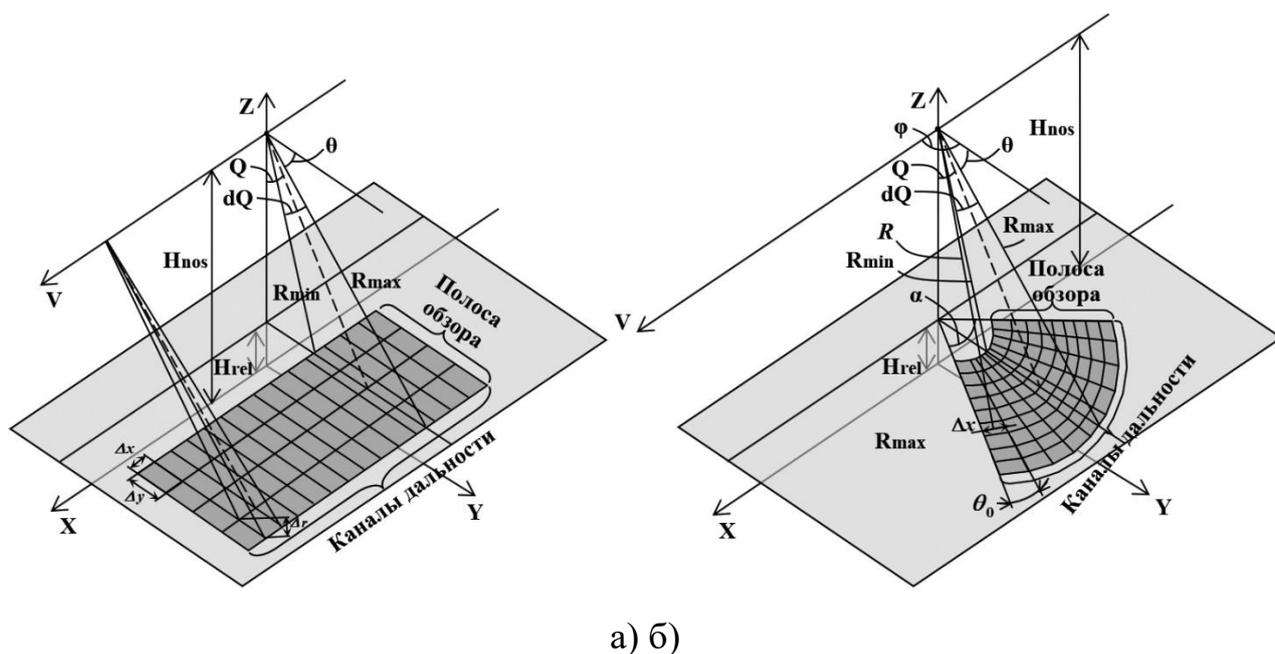


Рис. 2. Пример графика регрессионной зависимости УЭПР прикатанной пашни от длины волны зондирующего сигнала λ при фиксированных значениях угла наблюдения Q , среднеквадратического отклонения высот неровностей dh и влажности поверхности m

Расчет радиолокационных портретов металлических объектов сложной пространственной конфигурации на фоне подстилающей (фоновой) поверхности в приближении геометрической оптики подразумевает использование процедуры трассировки лучами комплексной ЦПММ, что обеспечивает локализацию фрагментов поверхностей объектов, попадающих в соответствующий элемент разрешения. Геометрическая сущность трассировки ЦПММ при моделировании радиолокационных датчиков бокового обзора с синтезированной апертурой и секторного (кругового) обзора показана на рис 3.



а) б)

Рис. 3. Геометрическая сущность трассировки ЦПММ при моделировании радиолокационных датчиков различного типа: а) радиолокатора с синтезированной апертурой; б) радиолокатора секторного (кругового обзора)

Если поверхность в элементе разрешения является непроводящей (обычно это подстилающая поверхность), то с использованием коэффициентов, полученных в результате запроса к БД ОХ для данного типа поверхности и заданных параметров радиолокационного датчика, а также условий наблюдения, осуществляется расчет значения эффективной площади рассеивания (ЭПР) данной поверхности в пределах элемента разрешения [10–12].

Учет особенностей формирования радиолокационных портретов (сигнатур) объектов сложной пространственной конфигурации в разработанной методике предусматривает расчет ЭПР фрагментов поверхности металлических

объектов, попадающих в элементы разрешения моделируемого радиолокационного датчика, в приближении физической оптики [5]. При этом последовательно выполняются этапы по расчету значений ЭПР каждого металлического объекта в составе комплексной ЦПММ и формированию их радиолокационных портретов.

При расчете значения ЭПР металлического объекта для каждого i -го фрагмента поверхности, находящейся в пределах элемента разрешения, определяется амплитудное значение отраженного сигнала E_{r_i} .

Считается, что фрагмент поверхности в пределах элемента разрешения представляет собой идеально проводящую пластину прямоугольной формы с размерами Δx и Δy , соответствующими размерам элемента разрешения.

Геометрическое представление процесса рассеяния плоской волны на прямоугольной проводящей пластине конечных размеров показано на рис. 4.

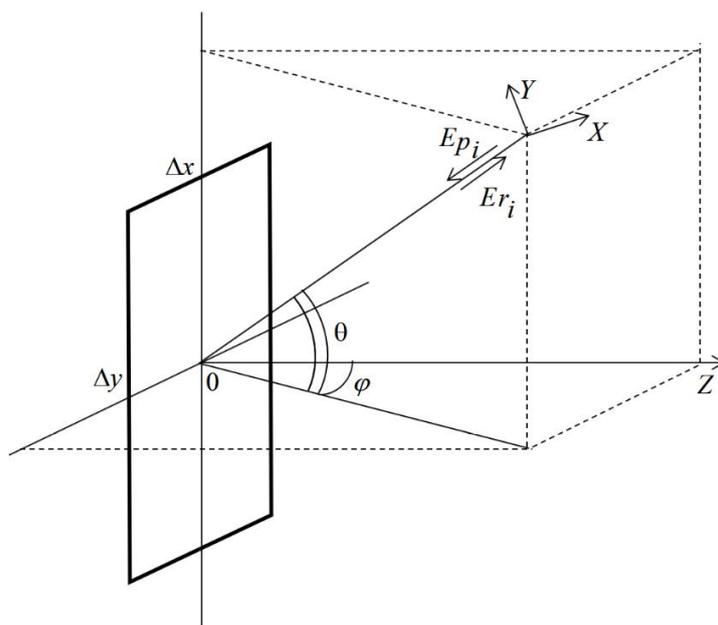


Рис. 4. Геометрическое представление процесса рассеяния плоской волны на прямоугольной проводящей пластине конечных размеров

В приближении физической оптики амплитудное значение отраженного от прямоугольной металлической пластины сигнала E_{r_i} не зависит от поляризации и определяется следующим выражением [5]

$$E_{r_i} = \sqrt{\sigma(\varphi, \theta)} = \frac{2\sqrt{\pi} \Delta x \Delta y}{\lambda} \left(\cos(\varphi) \cos(\theta) \frac{\sin(k \Delta x \sin(\varphi) \cos(\theta)) \sin(k \Delta y \sin(\theta))}{k^2 \Delta x \sin(\varphi) \cos(\theta) \Delta y \sin(\theta)} \right), (1)$$

где $\sigma(\varphi, \theta)$ – величина ЭПР металлической пластины,

λ – длина волны зондирующего сигнала,

φ – угол наблюдения в горизонтальной плоскости,

θ – угол наблюдения в вертикальной плоскости,

k – волновое число, $k = 2\pi / \lambda$.

Выражение (1) для расчета Er_i дает удовлетворительные результаты при условии $(\Delta x/2, \Delta y/2 > 3\lambda)$ и $(\varphi, \theta < 35^\circ)$. Суммарное значение ЭПР металлического объекта σ_{sum} вычисляется как квадрат суммы амплитудных значений сигналов Er_i , отраженных от фрагментов поверхности во всех элементах разрешения, в которые попадает металлический объект

$$\sigma_{sum} = \left(\sum_i Er_i \right)^2. \quad (2)$$

На этапе формирования радиолокационного портрета металлического объекта сложной пространственной конфигурации осуществляется распределение рассчитанного значения суммарной ЭПР объекта σ_{sum} по элементам разрешения (отсчетам яркости формируемого радиолокационного портрета).

При этом для каждого i -го элемента разрешения вычисляется его вклад (доля) относительно суммарного отраженного сигнала $\sum_i Er_i$ и вычисляется значение ЭПР σ_i i -го элемента разрешения

$$\sigma_i = \sigma_{sum} \frac{Er_i}{\sum_i Er_i}. \quad (3)$$

2. Результаты апробации модельно-ориентированной методики расчета радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов

Для оценивания возможности технической реализации разработанной методики, а также с целью верификации результатов расчета радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов сложной пространственной конфигурации был разработан экспериментальный образец программного

комплекса. Внешний вид главного диалогового окна программного комплекса с загруженной комплексной ЦПММ, содержащей в своем составе модели описания кораблей, и отображаемыми параметрами наблюдения радиолокационным датчиком показан на рис. 5.

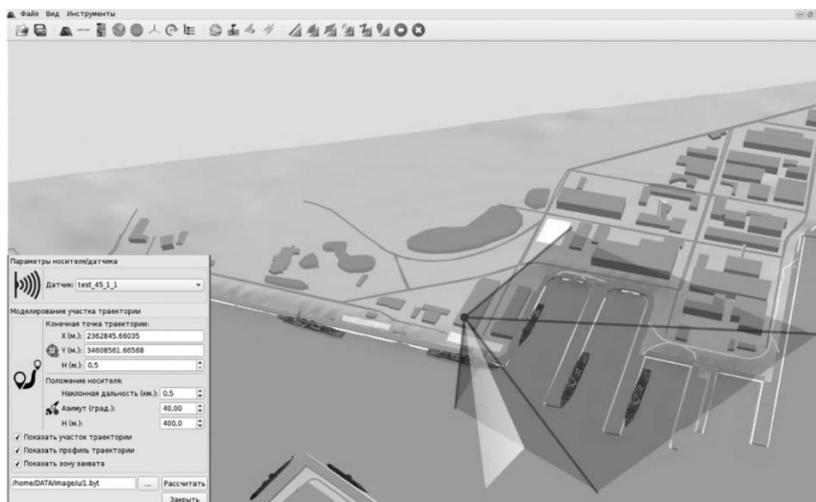


Рис. 5. Главное диалоговое окно программного комплекса расчета радиолокационных портретов объектов с загруженной комплексной ЦПММ, содержащей в своем составе модели описания кораблей

Пример результата расчета радиолокационных портретов кораблей в порту (у причальной стенки) в сантиметровом диапазоне длин волн показан на рис. 6.

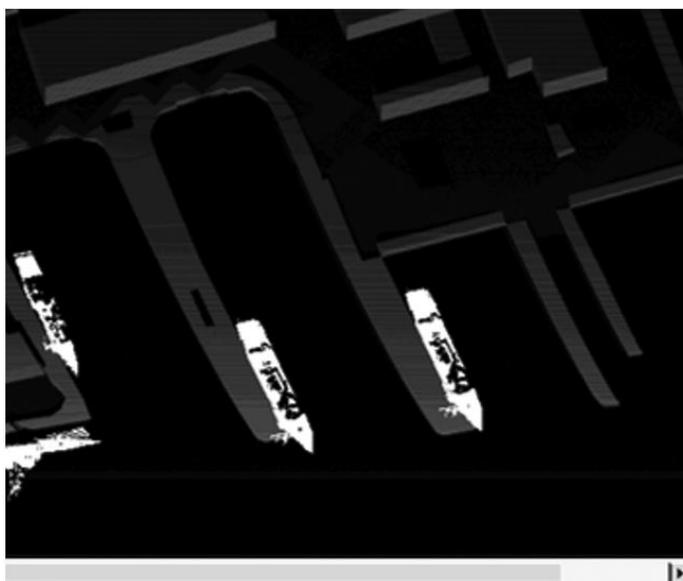


Рис. 6. Пример расчета радиолокационных портретов кораблей в порту (у причальной стенки) в сантиметровом диапазоне длин волн

Из примера на рис. 6 можно видеть, что разработанная авторами методика в целом обеспечивает учет характерных особенностей радиолокационного

наблюдения земной (надводной) поверхности, а именно: на расчетном (модельном) РЛИ присутствуют свойства для натуральных (экспериментальных) РЛИ области радиолокационной тени, участки более интенсивных отражений от вертикальных стенок и кромок, флуктуации отраженных сигналов, фоновые контрастные образования (между различными типами фонов и между фоновыми образованиями и металлическими объектами сложной пространственной конфигурации), а также масштабные искажения высотных объектов сцены по дальности (в направлении на радиолокационный датчик).

Для непосредственной верификации формируемых радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов были использованы доступные РЛИ авиационной техники (рис. 7), полученные экспериментальным путем в сантиметровом диапазоне длин волн с помощью радиолокатора с синтезированной апертурой «Компакт-100» (АО «НИИ ТП») [13, 14].

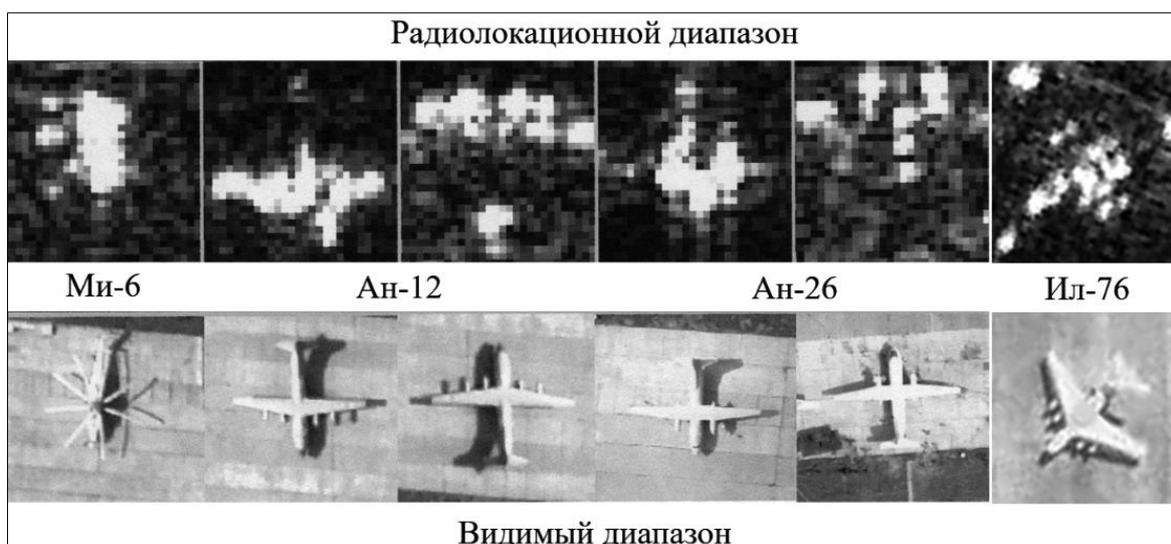


Рис. 7. Примеры экспериментальных РЛИ авиационной техники в сантиметровом диапазоне и соответствующие им портреты в видимом диапазоне спектра

В силу специфичности природы формирования изображений объектов сложной пространственной конфигурации в СВЧ-диапазоне, РЛИ различных типов самолетов (рис. 7) существенным образом отличаются от своих изображений в видимом диапазоне и очень сложны для восприятия и

интерпретации не только системами технического зрения, но и человеком (оператором).

Кроме того, анализ достаточного количества экспериментальных данных на примере летательных аппаратов различных типов (рис. 8) показал, что отсчеты яркости РЛИ и значения ЭПР одноптипных образцов наземной, авиационной и морской техники, наблюдаемых фактически при одних и тех же условиях, имеют значительный разброс.

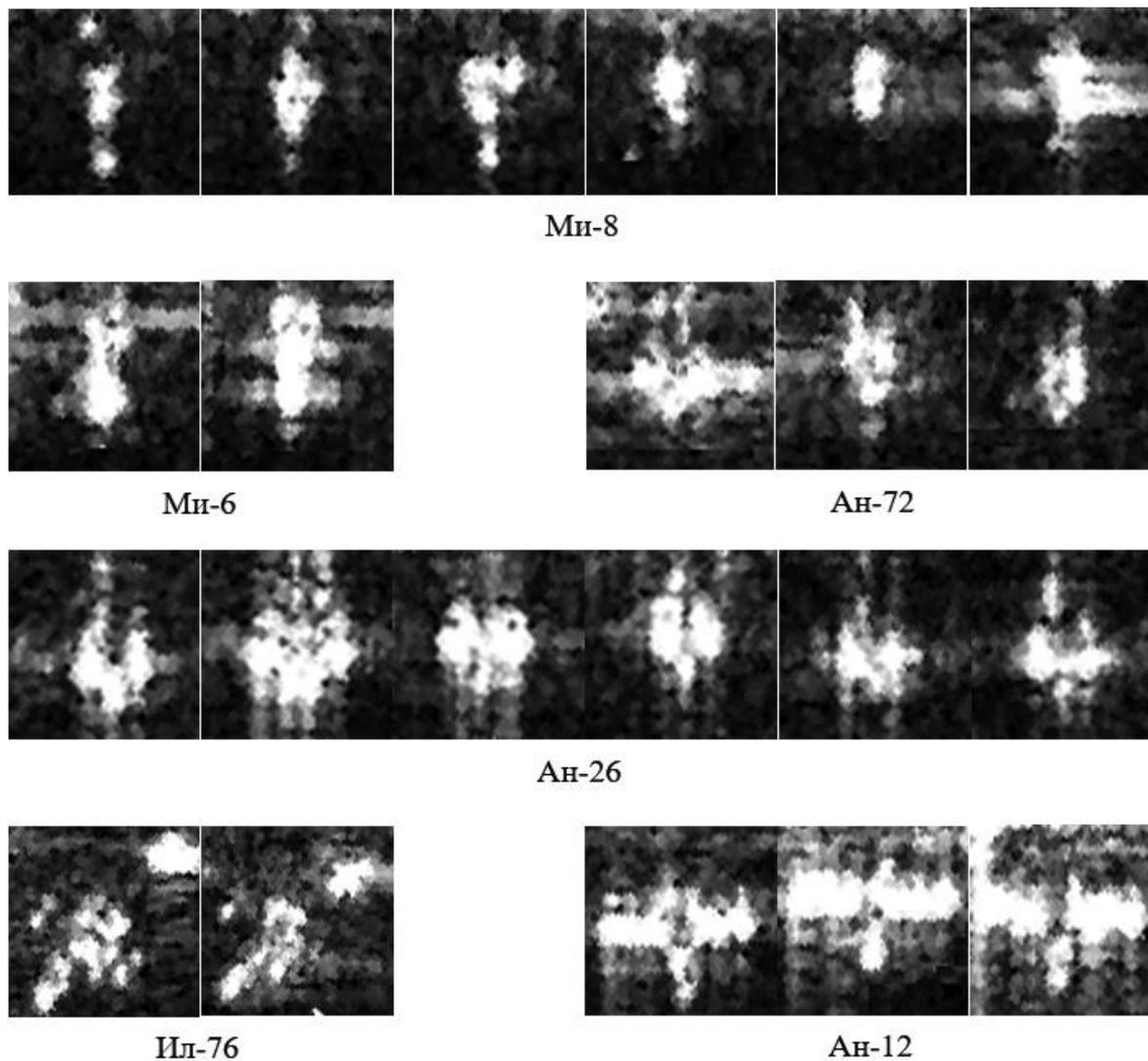


Рис. 8. Изменчивость натуральных РЛИ одноптипных образцов авиационной техники, наблюдаемых при идентичных условиях (ракурсах)

Данное обстоятельство обусловлено случайным характером возникновения локальных центров рассеяния (ЛЦР) и их существенной зависимостью от условий наблюдения, состояния самих объектов и их структурных элементов.

Причинами возникновения подобного рода ЛЦР могут являться многократные переотражения зондирующих сигналов (между элементами самого объекта, элементами объекта и подстилающей поверхностью), влияние острых кромок объекта и возникновение поверхностных токов, а также облучение поверхностей под прямыми углами или близкими к ним.

Принимая во внимание преимущественно локальный характер отражения волн сантиметрового и дециметрового диапазонов от металлических объектов сложной пространственной конфигурации, в результате которого на РЛИ наблюдаются немногочисленные участки наиболее интенсивного и устойчивого отражения (особенно от поверхностей, облучаемых под прямыми углами или близкими к ним), целесообразно осуществлять гистограммные (яркостные) преобразования РЛИ объектов.

Основной целью подобного рода преобразований является выделение устойчивых ЛЦР, характерных для того или иного объекта. В этом случае можно говорить о получении эталонного радиолокационного портрета (сигнатуры) объекта, по которому его можно однозначно интерпретировать. Как правило, для этого выбираются соответствующие пороговые значения яркости, с помощью которых осуществляется квантование РЛИ объекта, например, приводится к бинарному виду с двумя градациями яркости, как показано на рис. 9.

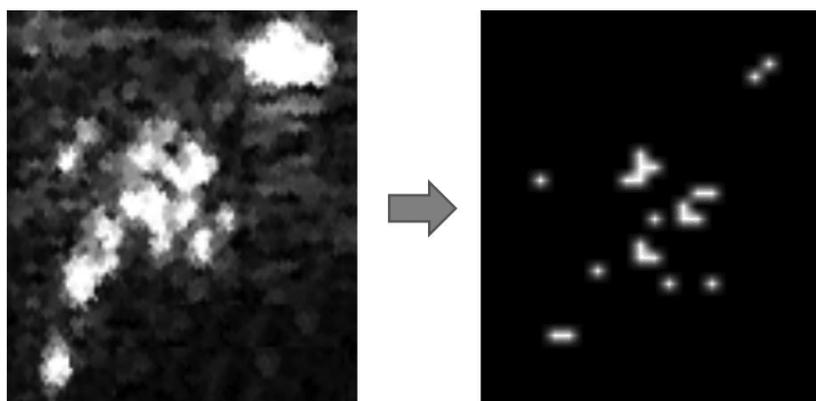


Рис. 9. Результат формирования натурального радиолокационного портрета (сигнатуры) объекта сложной пространственной конфигурации на примере самолета Ил-76

Верификация разработанной методики осуществлялась путем экспертного оценивания степени соответствия (адекватности) рассчитанных с ее помощью

радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов сложной пространственной конфигурации соответствующим экспериментальным данным, полученным при аналогичных условиях применительно к однотипным объектам.

На рис. 11 в качестве примера показан результат формирования на основе тестовой ЦПММ (рис. 10) модельного РЛИ земной поверхности, содержащего изображения авиационной техники на фоне подстилающей поверхности (рис. 12), соответствующие экспериментально полученным РЛИ однотипных образцов самолетов и вертолетов (рис. 8).

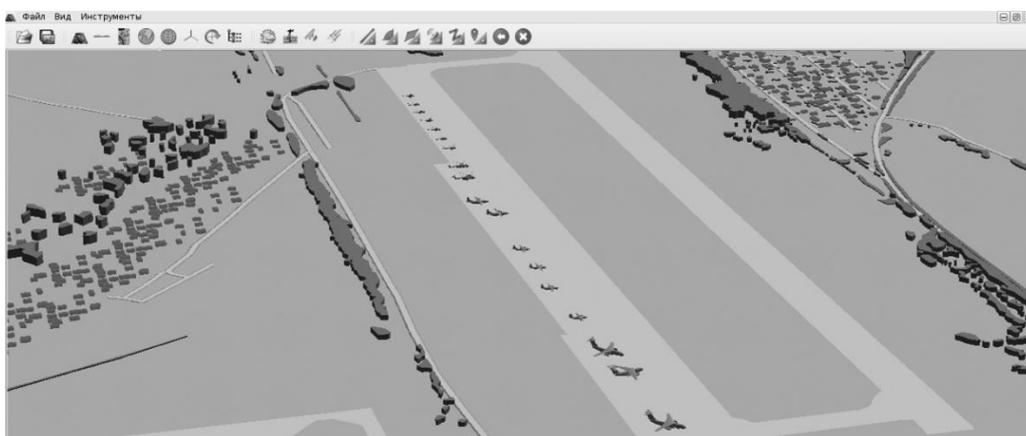


Рис. 10. Пример тестовой ЦПММ для расчета радиолокационных портретов (сигнатур) объектов авиационной техники

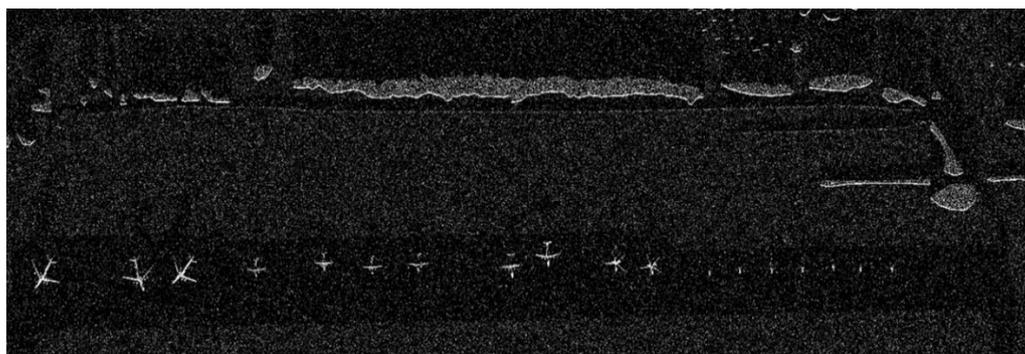


Рис. 11. Пример расчета РЛИ тестового участка земной поверхности, содержащего изображения авиационной техники на фоне подстилающей поверхности

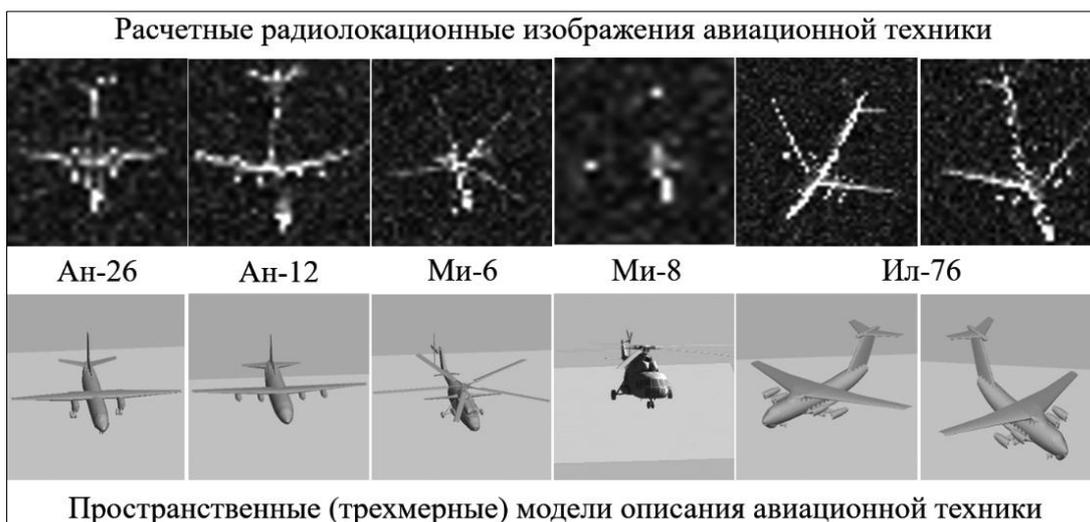


Рис. 12. Расчетные РЛИ авиационной техники на фоне подстилающей поверхности, сформированные на основе пространственных (трехмерных) моделей их описания

На завершающем этапе при формировании радиолокационных портретов (сигнатур) верифицируемых образцов авиационной техники было выполнено пороговое квантование (бинаризация) их расчетных РЛИ. Результат формирования модельного радиолокационного портрета (сигнатуры) объекта сложной пространственной конфигурации на примере самолета Ил-76 представлен на рис. 13.

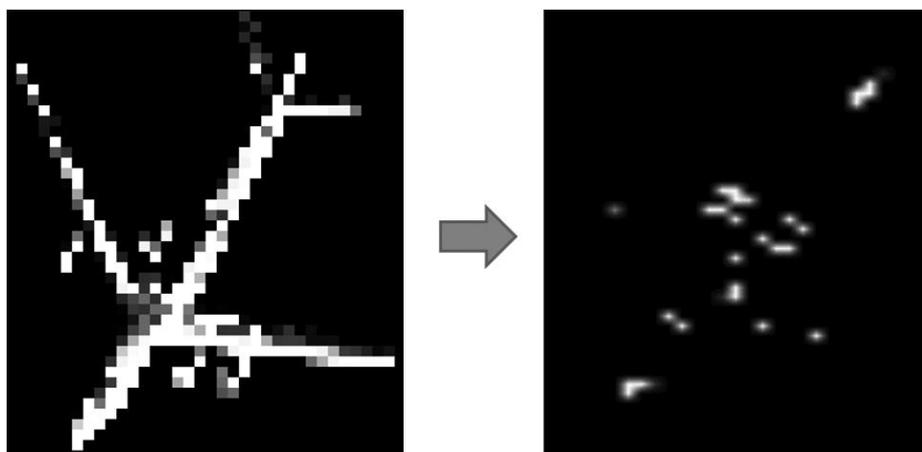


Рис. 13. Результат формирования модельного радиолокационного портрета (сигнатуры) объекта сложной пространственной конфигурации на примере самолета Ил-76

Результаты сравнительного анализа радиолокационных портретов (сигнатур) объектов авиационной техники (на примере самолета Ил-76), полученных на основе обработки натуральных (экспериментальных) РЛИ (рис. 9) и

путем расчета в соответствии с разработанной методикой (рис. 13), свидетельствуют о том, что модельные радиолокационные портреты (сигнатуры) объектов обладают высокой степенью соответствия (адекватности). При этом основной вклад в формирование радиолокационных сигнатур объектов, как и ожидалось, вносят ЛЦР, что подтверждается результатами проведенных ранее многочисленных экспериментальных и теоретических исследований [15, 16].

Несмотря на принятые в методике допущения (учет только устойчивых ЛЦР, возникающих при облучении поверхностей под прямыми углами или близкими к ним), результаты верификации расчетных радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов сложной пространственной конфигурации, полученных с использованием предложенной методики, показали, что расчетные значения ЭПР для конкретного образца наземной, авиационной или морской техники при заданных условиях наблюдения и параметрах функционирования радиолокационного датчика не выходят за границы областей разброса значений ЭПР для каждой совокупности однотипных образцов техники, измеренных по натурным (экспериментальным) данным.

Кроме того, за счет реализации в предлагаемой методике упрощенного подхода к формированию радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов сложной пространственной конфигурации, обеспечивается сокращение временных и вычислительных затрат, что, наряду с применением современных технологий обработки трехмерной машинной графики (например, с использованием средств OpenGL, OpenCL), позволит уже сейчас реализовать расчетные операции в режиме реального времени [17].

Заключение

Разработанная модельно-ориентированная методика расчета радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов, в том числе сложной пространственной конфигурации, обеспечивает оперативный расчет достоверных разноракурсных точечных (образованных информативными устойчивыми ЛЦР) портретов (сигнатур) металлических объектов наземной,

авиационной и морской техники на фоне подстилающей поверхности на основе ЦПММ с учетом параметров функционирования моделируемых радиолокационных датчиков наблюдения.

Отличительной особенностью разработанной методики является ее простота (учитываются исключительно информативные устойчивые ЛЦР, формируемые при облучении поверхностей под прямыми углами или близкими к ним) и, как следствие, достаточно низкие вычислительные затраты на формирование радиолокационных портретов (сигнатур) объектов, не обладающих избыточностью вследствие принятых в предлагаемой методике допущений (отсутствие учета многократных переотражений зондирующих сигналов, влияния острых кромок объекта, возникновения поверхностных токов и др.).

Следует отметить, что даже при учете всех указанных особенностей при моделировании радиолокационных портретов (сигнатур) объектов, не может быть обеспечено их гарантированное соответствие (адекватность) экспериментальным данным, в том числе из-за невозможности априорного учета всего многообразия реальной действительности (точной ориентации объекта в пространстве, состояния его поверхностей и покрытий, относительного положения составных элементов объекта и признаков функционирования его бортовой радиоэлектронной аппаратуры и т.п.).

В этом случае дополнительно потраченные вычислительные ресурсы и временные затраты могут оказаться необоснованными и не позволят достичь значимого положительного эффекта.

С учетом отмеченных особенностей областью применения предложенной методики является информационное обеспечение автоматизированных систем и комплексов обработки РЛИ, функционирующих в реальном масштабе времени.

Автор для переписки: Филиппских Евгений Эдуардович, phil_ml@list.ru

Литература

1. *Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов. Методы и алгоритмы.* Под ред. А.В. Коренного. Москва, Радиотехника. 2012. 112 с.
2. Уфимцев П.Я. *Метод краевых волн в физической теории дифракции.* Москва, Рипол Классик. 1962. 244 с.
3. Мальцев В.В., Сисигин И.В., Колесников К.О. Подход к моделированию радиолокационных сигналов, отраженных от объектов сложной пространственной конфигурации. *Радиопромышленность.* 2018. №1. С.42-49.
4. Сучков В.Б. Объектно-ориентированный метод определения комплексных коэффициентов отражения элементов полигональной модели объекта локации. *Системы и средства связи, телевидения и радиовещания.* 2013. №1-2. С.159-165.
5. Кобак В.О. Радиолокационные отражатели. Москва, Советское радио. 1975. 248 с.
6. Боровиков В.А. Кинбер Б.Е. Геометрическая теория дифракции Москва, Связь. 1978. 248 с.
7. Сюзев В.В., Доденко И.А. Применимость высокодетализированной математической модели фоноцелевой обстановки в стендах моделирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение.* 2017. №6. С.76-92.
8. Бырков И.А., Филиппских Е.Э. Расчет радиолокационных изображений на основе трехмерных цифровых моделей местности. *Информационно-измерительные и управляющие системы.* 2009. №7. С.62-69.
9. Филиппских Е.Э., Попов А.В., Кузьмин В.В., Владимиров В.В. Моделирование радиолокационных изображений подстилающей поверхности для видеоподдержки обнаружения малоразмерных объектов. *Информация и Космос.* 2016. №3(6). С.124-131.
10. Зубкович С.Г., Бырков И.А. База данных моностатических и бистатических отражательных характеристик типовых естественных фонов и искусственных

покрытий. *Науч.-техн. сб. (Тр. войск. части 41513)*. Министерство обороны РФ. 2003. №5. С.251-257.

11. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. *Радиолокационные системы землеобзора космического базирования*. Москва, Радиотехника. 2010. 680 с.
12. Баскаков А.И., Жутяева Т.С., Лукашенко Ю.И. *Локационные методы исследования объектов и сред: учебник для студ. учреждений высш. проф. Образования*. Москва, Академия. 2011. 384 с.
13. Внотченко С.Л., Достовалов М.Ю., Зайцев А.Б., Мусинянц Т.Г. Анализ яркостных характеристик радиолокационных изображений РСА «Компакт-100». *Труды XX и XXI всероссийских симпозиумов по радиолокационному исследованию природных сред*. СПб. 2003. №3. С.7-25.
14. Внотченко С.Л., Достовалов М.Ю., Ермаков Р.В., Мусинянц Т.Г., Севалкина Е.П. Основные результаты зондирования земной и водной поверхности многочастотным радиолокационным комплексом радиолокаторов с синтезированной апертурой «Компакт». *Вестник СибГАУ*. 2013. №5(51). С.35-38.
15. Штагер Е.А. *Рассеяние радиоволн на телах сложной формы*. Москва, Радио и связь. 1986. 184 с.
16. Штагер Е.А. *Радиолокационные антиподы кораблей*. СПб., ВВМ. 2009. 197 с.
17. Павленко Д.В., Здех В.Л. Использование технологии Open CL для реализации моделирования построения радиолокационного изображения в режиме реального времени. *Вопросы радиоэлектроники*. 2018. №9. С.64-69.

Для цитирования:

Филиппских Е.Э., Попов А.В., Галкин Ф.А., Морозов С.В. Модельно-ориентированная методика расчета радиолокационных портретов (сигнатур) металлических объектов. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2022. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.3.5>