

Технология распознавания радиолокационных изображений с формированием эталонов путем моделирования

Д.А. Жердев^а, Е.Ю. Минаев^а, В.В. Прокудин^а, В.А. Фурсов^{а,б}

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^б Институт систем обработки изображений РАН филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

Аннотация

В работе исследуется технология распознавания, основанная на использовании в качестве обучающих примеров радиолокационных изображений, сформированных путем моделирования. Предлагаемый подход сравнивается с традиционной технологией обучения на реальных данных из базы радиолокационных изображений MSTAR. Достижимое качество распознавания исследуется для трех объектов из указанной базы. Изображения объектов смоделированы как при тех же ракурсах, при которых получены реальные изображения, так и для их ближайших значений. В качестве алгоритма обучения и распознавания используется предложенный авторами в предшествующих работах метод опорных подпространств. Приводятся результаты экспериментов, подтверждающие возможность достижения высокого качества распознавания при обучении классификатора на изображениях, полученных путем моделирования.

Ключевые слова: синтезированная апертура; метод опорных подпространств; обработка изображений

1. Введение

В настоящее время дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является одним из основных источников информации об объектах на поверхности земли без непосредственного физического контакта с этими объектами. Дистанционное зондирование осуществляется с помощью летательных аппаратов различных типов с целью обнаружения, классификации и анализа объектов земной поверхности, а также атмосферы и океана. Одним из наиболее перспективных направлений развития систем ДЗЗ является активное (сигнал излучается самолетом или космическим спутником) радиолокационное зондирование Земли. Важнейшим преимуществом этих систем является независимость от погодных условий, облачность, слабое освещение и др.

Вместе с тем, создание систем радиолокационного зондирования Земли предназначенных для обнаружения и классификации объектов связано с рядом проблем. Основные трудности распознавания радиолокационных изображений (РИ) связаны с изменчивостью образов при различных условиях зондирования и, обычно, низким разрешением. Существенного повышения РИ удастся достичь путем формирования изображений с синтезированной апертурой (*Synthetic Aperture Radar* - SAR). Тем не менее, даже для этих изображений пока недостижима детальность, характерная для оптических изображений. Для радиолокационных изображений характерным является отсутствие четких контуров, что служит серьезным препятствием для выделения на этих изображениях, например, геометрических признаков. Поэтому в большинстве технологий распознавания РИ в качестве компонент вектора признаков используют сами отсчеты изображения.

Другая серьезная проблема – получение обучающих эталонных изображений. Обычно обучающие изображения получают путем проведения натурных испытаний на полигонах или в безэховых камерах. По результатам этих испытаний составляется база данных радиолокационных изображений объектов при разных ракурсах наблюдения. Поскольку РИ сильно различаются даже при незначительном изменении ракурса наблюдения для надежного распознавания необходимо хранить огромное число эталонных изображений. Получение таких обучающих наборов данных путем натурных испытаний потребует огромных затрат ресурсов, времени и доступности подлинного объекта исследований. Поэтому актуальна задача создания технологии моделирования радиолокационных изображений, которая могла бы использоваться для обучения классификатора взамен натурных эталонов. Такая технология моделирования РИ должна, насколько возможно, точно имитировать реальные процессы облучения и отражения радиолокационных сигналов. Настоящая работа посвящена разработке такой технологии.

2. Метод моделирования

Один из подходов к решению сформулированной выше задачи состоит в том, что в памяти хранятся только трехмерные компьютерные модели объектов, а эталонные РИ формируются с их использованием путем имитации облучения трехмерной модели с учетом информации о текущем ракурсе наблюдения [1]. Этот путь представляется конструктивным, поскольку информацию о ракурсе наблюдения обычно удается получить из наблюдения за текущими параметрами летательного аппарата, осуществляющего зондирование. Ясно, что при этом должна также задаваться модель подстилающей поверхности с заданными радиолокационными характеристиками.

К сожалению, в известных реализациях этого подхода [1] пока отсутствует возможность оперативного формирования детальных трехмерных объектов из некоторых геометрических примитивов. Обычно идут по пути задания некоторых общих статистических характеристик объекта, что сужает возможности этого подхода. При этом, как и в случае формирования эталонов с помощью натурных испытаний, число вариантов изображений ограничено, что

снижает быстродействие и качество распознавания РИ. При моделировании РИ путем имитации облучения трехмерной модели, составленной из примитивов, имеющих простую геометрическую форму, число возможных создаваемых эталонов практически не ограничено.

Такой подход привлекателен в задачах распознавания и интерпретации радиолокационных изображений [2-4]. В частности, в работе [3] исследовалась проблема распознавания радиолокационных изображений, с использованием моделируемых диаграмм рассеяния, полученных путем моделирования рассеяния электромагнитного излучения на трехмерных моделях объектов, «собранных» из параллелепипедов. Однако такие модели оказываются недостаточно информативными. Для решения задач распознавания более предпочтительными, с точки зрения информативности представления деталей объекта, являются изображения формируемые радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА).

Процесс формирования радиолокационного изображения в радиолокаторе в РСА основан на использовании когерентной фазовой информации, содержащейся в последовательности отраженных сигналов, полученной на участке синтезирования, существенно превышающем длину реальной антенны. Синтезирование апертуры осуществляется в результате перемещения летательного аппарата, на котором установлена РЛС, по некоторой заранее известной или измеряемой траектории, причем диаграмма направленности антенны РЛС ориентирована под углом к вектору скорости летательного аппарата. Принимаемые отраженные сигналы запоминаются по фазе и амплитуде и затем обрабатываются для получения изображения. Координатами изображения являются наклонная дальность до объекта и расстояние вдоль линии пути носителя (азимут). Высокое разрешение по наклонной дальности достигается благодаря применению широкополосных излучаемых сигналов, а по азимуту – в результате когерентного (синфазного) сложения большого числа отраженных импульсов. В результате азимутальной обработки происходит повышение разрешающей способности РЛС вдоль линии пути носителя.

В зависимости от угла между вектором скорости носителя V_n и осью диаграммы направленности антенны РЛС различают боковой, переднебоковой и заднебоковой обзоры. Мы будем рассматривать только боковой обзор (рис. 1), при котором ось диаграммы направленности антенны перпендикулярна линии движения носителя РСА ($\theta_n=90^\circ$). Длина синтезированной апертуры при боковом обзоре определяется шириной зоны облучения по азимуту L_a реальной антенны.

Будем также полагать, что носитель РСА перемещается равномерно и прямолинейно на неизменной высоте над земной поверхностью. Физическую сущность и математическое описание процессов преобразования радиолокационных сигналов в РСА можно представить в виде модели радиолокационного обзора Земли, изображенной на рисунке 2. Заметим, что все звенья этой модели, кроме системы обработки, являются аналогичными для всех типов РЛС. Система обработки в РСА отличается тем, что обеспечивает накопление и когерентную обработку принимаемых сигналов в течение времени синтезирования апертуры. Именно благодаря этим операциям обычная РЛС превращается в РСА.

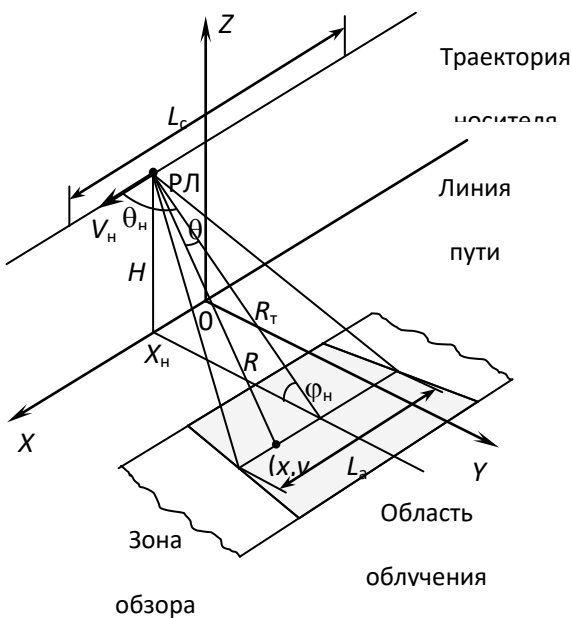


Рис. 1. Схема бокового радиолокационного обзора.

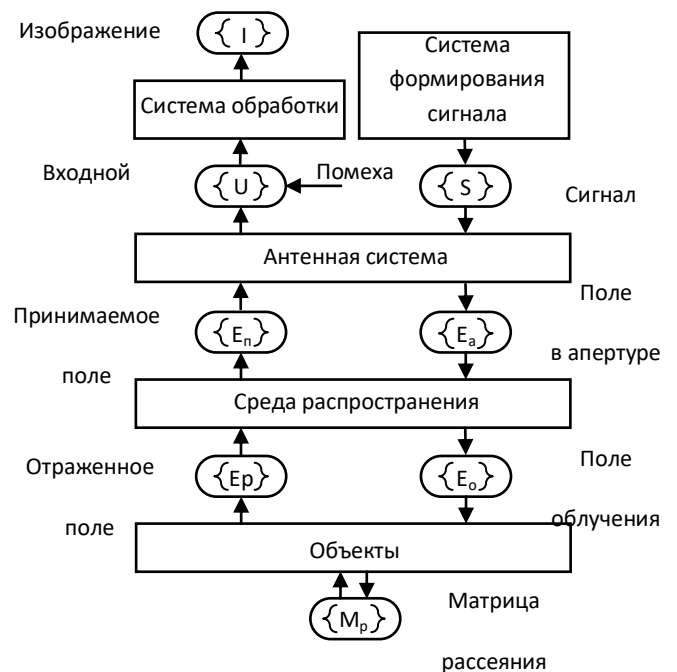


Рис.2. Общая модель радиолокационного обзора.

Опираясь на представленную структуру общей модели радиолокационного обзора можно записать универсальное выражение для определения интенсивности сигнала радиолокационного изображения, наблюдаемого в произвольной точке x_u, y_u , как:

$$I(x_u, y_u) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int v(x, y) \chi(x, y, x_u, y_u) dx dy, \quad (1)$$

где $I(x_u, y_u)$ - выходной сигнал, $v(x, y)$ - функция отражения, а $\chi(x, y, x_u, y_u)$ - функция неопределенности РСА. Приведенная модель позволяет решать задачу моделирования РИ, с единых позиций пространственно-временного описания процессов формирования сигналов и помех, их распространения, приема и обработки.

Настоящая работа структурирована следующим образом. В следующем разделе 3 мы дадим описание общей структурной схемы моделирования радиолокационных цифровых моделей местности. В разделе 4 мы приведем опирающиеся на представление модели радиолокационного обзора в виде (1) конкретные примеры моделирования РИ объектов различной сложности. Наконец, в заключительном разделе 5 будут приведены результаты исследования технологии распознавания радиолокационных изображений объектов с использованием эталонов, формируемых путем моделирования.

3. Общая схема системы моделирования РИ

Структурная схема разработанной программной системы моделирования радиолокационных изображений приведена на рисунке 3. Система состоит из следующих компонент: редактор карт, 3D-визуализатор с встроенным редактором, генератор рельефа, общий интерфейс. Технология моделирования состоит из двух основных этапов: формирование типовых рельефов по заданным параметрам и последующее формирование на этом рельефе факетной модели с заданными радиолокационными характеристиками.

На трехмерную сцену рельефа также можно поместить различные техногенные объекты с заданными размерами и формой. Цифровая модель объекта задается в факетном виде. Каждому факету соответствует определенный физический материал, с заданной удельной ЭПР, составляющих его материалов, которые характеризуются различной проницаемостью для электромагнитного излучения радара.

Для имитации отраженного сигнала используется модель диффузного и зеркального отражения рельефа и объектов сцены. Для каждого факета, характеризующегося вектором нормали, интенсивность диффузного отражения вычисляется в соответствии с законом Ламберта, а зеркального отражения – в соответствии с эмпирической моделью Буи-Туонга Фонга. Коэффициенты диффузного и зеркального отражения задаются в соответствии с нормированными удельными ЭПР материалов.

Радиолокационные характеристики трехмерной сцены в целом определяются комбинацией характеристик объектов и подстилающей поверхности с учетом возможности переотражения. Трёхмерные сцены после генерации хранятся в виде факетной модели.

Рассматриваемая технология моделирования обучающих множеств для распознавания РИ, позволяет существенно сократить расходы на формирование эталонных изображений. Более того, поскольку исходная информация о форме и материалах, из которых состоят подстилающая поверхность и техногенные объекты могут, комбинироваться в любых сочетаниях, а модели объектов любой формы «собираются» из составных элементов простой формы, число различных вариантов моделируемых РИ практически не ограничено. В следующем разделе приведены примеры моделирования различных объектов с использованием разработанной технологии.

4. Примеры моделирования

Для иллюстрации вначале приведем примеры моделирования РИ простейших объектов: сфера и линейный отражатель. Полезность этих примеров состоит в том, что для этих объектов можно провести сравнение с аналитическими моделями.

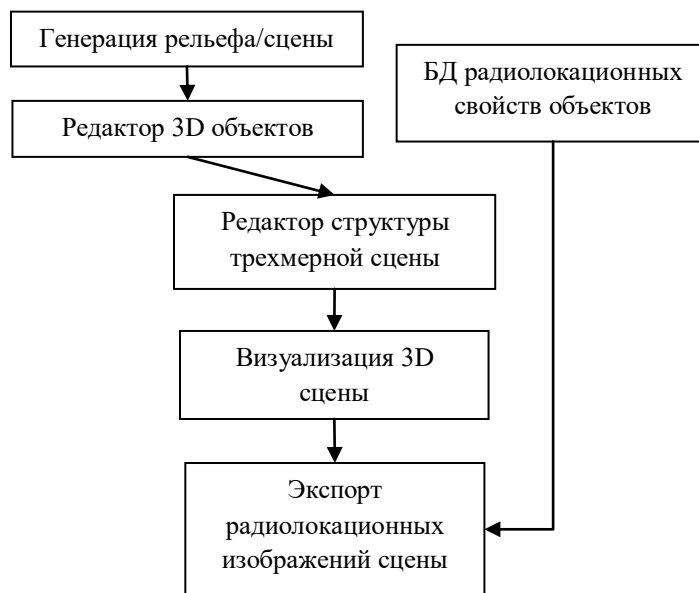


Рис. 3. Структурная схема системы моделирования.

На рис. 4, а) приведен пример моделирования траекторного сигнала, для простого зондирующего импульса с прямоугольной огибающей высокочастотных колебаний, отраженного от сферы и получаемого моделью радиолокатора. Радиус сферы равен одному метру. При моделировании использовались характеристики носителя и радара, указанные в таблице 1.

На рис. 4, б) представлен результат моделирования для той же сферы, но излучался и принимался ЛЧМ-импульс. Параметры моделирования те же, что и в таблице 1, с разницей в параметре частоты дискретизации равной 299.79 МГц и длительности зондирующего импульса равной 3 мкс.

Ниже, на рисунке 5, приводится также пример моделирования траекторного сигнала, отраженного от линейного отражателя размером один метр с теми же параметрами моделирования, что указаны в таблице 1. На изображении хорошо видно, что сигнал от линейного отражателя в отличие от сферы состоит из двух краевых волн. Приведенные изображения демонстрируют хорошее совпадение с результатов моделирования РИ с аналитическими решениями.

Таблица 1. Параметры моделирования сферы

Скорость носителя	360 км/ч
Частота дискретизации по дальности	14989.62 МГц
Частота следования зондирующих импульсов	200 Гц
Длина волны	0.1 м
Длительность импульса	0.006671 мкс
Разрешение по азимуту	1 м
Разрешение по дальности	1 м
Расстояние до первого канала	9999 м
Длина апертуры	499.95 м
Точек выборки по азимуту	0.5 м
Шаг выборки по азимуту	0.5 м
Шаг выборки по дальности	0.01 м

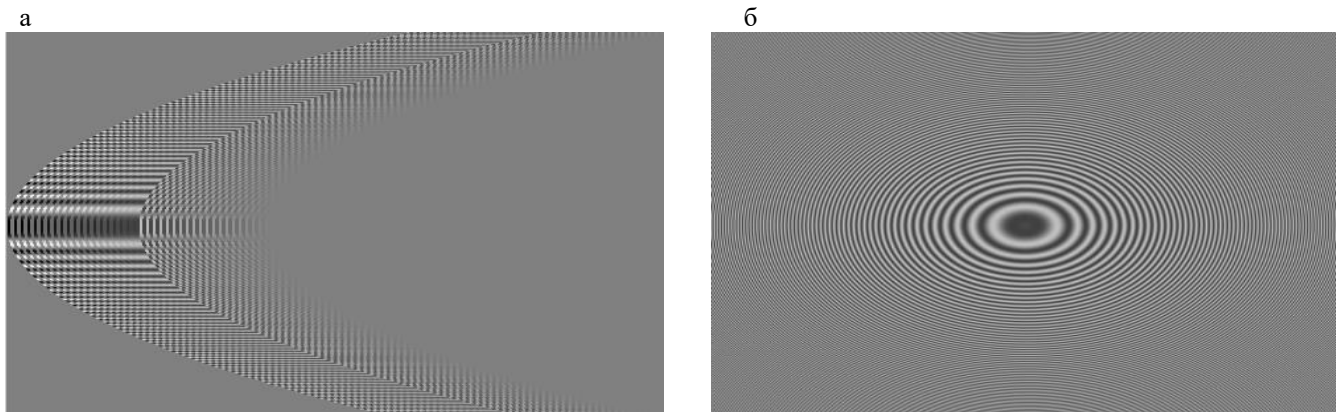


Рис. 4. Траекторный сигнал для зондирующих импульсов, отраженных от сферы: а) простого; б) ЛЧМ.

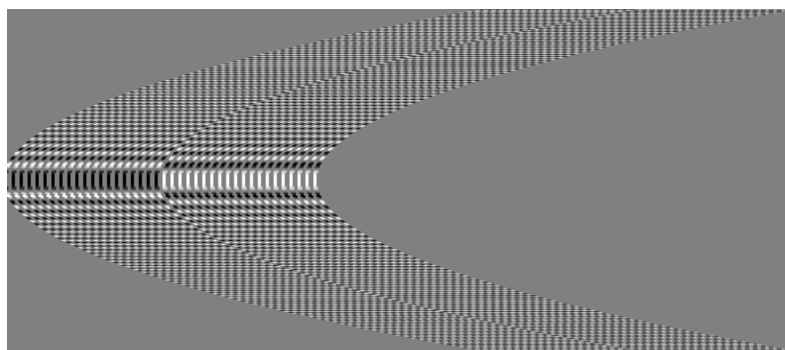


Рис. 5 Траекторный сигнал линейного отражателя для простого зондирующего импульса.

На рисунке 6 приведены результаты моделирования радиолокационных изображений реальных объектов с использованием метода, описанного в работе [5]. Осуществлялось моделирование радиолокационных изображений танка, трехмерная модель которого приведена на рис. 6, а). Полученные радиолокационные изображения для углов азимута 17° и 15° и углов места 17° и 100° показаны на рисунке 6, б) и в) соответственно. Ниже на рисунках 7, а) и б) приведены радиолокационные изображения танка при значениях углов азимута и места, близких к аналогичным изображениям из базы тестовых радиолокационных изображений MSTAR.

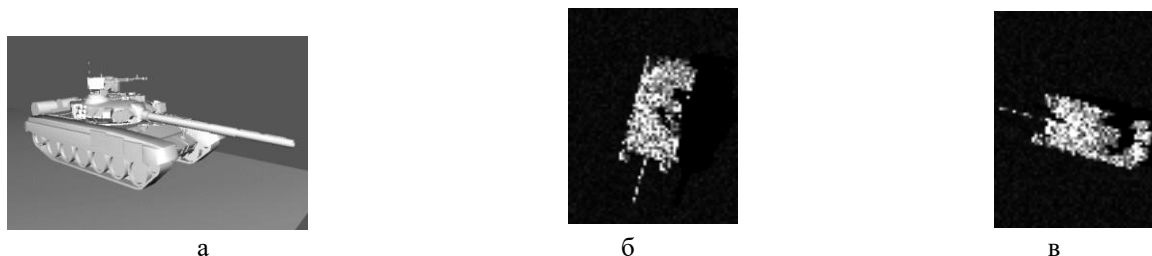


Рис. 6. Трёхмерная модель а) и модельные РИ танка: б) угол азимута 17°, угол места 15°; в) угол азимута 17°, угол места 100°.



Рис. 7. РИ танка из базы MSTAR а) угол азимута 17°, угол места 1°; в) угол азимута 17°, угол места 93°.

Визуально, полученные путем моделирования изображения воспринимаются как достаточно «похожие». В следующем разделе приводятся результаты объективной оценки качества моделирования по показателю сравнительного качества распознавания по натурным и модельным эталонам.

5. Распознавание по модельным изображениям

Исследовалась возможность и эффективность сквозной технологии моделирования и распознавания с использованием обучающих РИ, полученных путем моделирования двумерных РИ описанным выше методом. Для распознавания объектов на РИ использовался метод опорных подпространств, предложенный авторами в работах [2,3]. Результаты сравнения качества распознавания по модельным и реальным (из базы MSAR) данным приведены в таблице 2. Качество распознавания по изображениям, полученным путем моделирования, как и следовало ожидать, несколько ниже по сравнению с результатами, полученными на изображениях из базы MSTAR. Тем не менее, процент верных распознаваний все-таки достаточно высокий.

Вместе с тем, применение технологии распознавания с использованием на этапе обучения модельных эталонов дает огромную экономию ресурсов, которые необходимы при проведении натуральных испытаний на полигонах и в безэховых камерах. При этом качество распознавания может быть достаточно высоким за счет того, что при зондировании Земли с летательного аппарата обычно имеется возможность точно определять углы азимута и цели по измерениям параметров движения бортовыми приборами.

Был также проведен эксперимент, в котором решалась задача распознавания модельных данных, которые подвергались предварительной обработке (локализация, центрирование) с использованием тех же алгоритмов обработки реальных изображений базы MSTAR. Для этого формировалась выборка модельных радиолокационных изображений трех типов объектов. Набор из 50-ти изображений был разделен на два набора (40 изображений для обучения; 10 изображений для тестирования). Изображения в обучающем и тестовом наборах выбирались из общего пула случайно.

В рамках описанной схемы эксперимента доля правильно распознанных объектов составила 74%. Для повышения качества распознавания проводился еще один эксперимент с предварительным разбиением класса на два подкласса так, как это описано в работе [2]. При этом процент правильно распознанных объектов составил 84%.

Таким образом, результаты по распознаванию модельных и реальных данных с помощью метода опорных подпространств демонстрирует хорошие результаты по сравнению с другими популярными методами [3]. Данный факт вселяет оптимизм для дальнейших разработок в области моделирования и распознавания РИ.

6. Заключение

В данной работе проведены исследования предложенного метода моделирования радиолокационных изображений с использованием трехмерных сцен местности на основе реальных карт или путем генерирования случайного рельефа. В работе описан метод моделирования радиолокационных изображений, формируемых радиолокатором путем синтеза апертуры. Исследования показали, что разработанный комплекс моделирования включающий в себя редактор карт, 3D-визуализатор с встроенным редактором, генератор рельефа, общий интерфейс и программу моделирования радиолокационных изображений обладает высокой эффективностью в задаче распознавания объектов на подстилающих поверхностях. Разработанные компоненты системы моделирования, например, генератор рельефа

Таблица 2. Сравнение качества распознавания по модельным и реальным РИ

PSNR	MSTAR	Модельные
Без шума	0,855	0,765
28 dB	0,781	0,741
22 dB	0,754	0,734
18 dB	0,703	0,673
16 dB	0,658	0,658

могут быть использованы для решения других задач формирования изображений рельефа в различных электромагнитных диапазонах.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки.

Литература

- [1] Балтер, Б.М. Методика имитационного моделирования РСА-изображений земной поверхности / Балтер Б.М., Балтер Д.Б., Егоров В.В., Калинин А.П., Родионов И.Д., Стальная М.В. // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 3. – С. 9-19.
- [2] Жердев, Д. А. Распознавание объектов на радиолокационных изображениях с использованием показателей сопряжённости и опорных подпространств / Жердев Д.А., Казанский Н.Л., Фурсов В.А. // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39(2). – С. 255-264.
- [3] Жердев, Д. А. Распознавание объектов по диаграммам рассеяния электромагнитного излучения на основе метода опорных подпространств / Жердев Д.А., Казанский Н.Л., Фурсов В.А. // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38(3). – С. 503-510.
- [4] Tang, K. A geometrical-based simulator for target recognition in high-resolution SAR images / K. Tang, X. Sun, H. Sun, H. Wang // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2012. – V. 9 (5). – P. 958-962
- [5] Zherdev, D.A. Support plane method applied to ground objects recognition using modelled SAR images / D.A. Zherdev, V.A. Fursov // Proceedings of SPIE 9599, Applications of Digital Image Processing XXXVIII. – 2015. – P. 95992J-95992J-7. DOI: 10.1117/12.2188531.