

ФОРМИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ВИДЕ СТОХАСТИЧЕСКИХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А.П. Кадочников¹, А.А. Казанцев¹, О.А. Мишуков^{1*}, С.А. Шигорев¹

¹Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация
*Адрес для переписки: oleg_mish@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.391

Статья поступила в редакцию 29.07.2019

Ссылка для цитирования: Кадочников А.П., Казанцев А.А., Мишуков О.А., Шигорев С.А. Формирование моделей радиолокационных изображений в виде стохастических дифференциальных уравнений для распознавания космических объектов // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 4. С. 106–113. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-4-106-113

Аннотация: Показана ресурсная проблематика традиционного использования детальных радиолокационных изображений для надежного распознавания космических объектов. Поставлена актуальная задача формирования нового типа моделей радиолокационных изображений космических объектов для определения признаков их распознавания. Представлены соответствующие математические модели таких изображений на основе стохастических дифференциальных уравнений эллиптического типа. Проведена оценка адекватности разработанных моделей реальным радиолокационным изображениям космического объекта. Установлено, что для описания радиолокационных изображений космических объектов наиболее подходящей является модифицированная модель в виде смешанной производной эллиптической модели. Для проверки гипотезы о возможности использования модели радиолокационных изображений при построении дескриптивных признаков распознавания проведен эксперимент по различению четырех разных типов космических объектов. Результаты эксперимента показали возможность использования смешанной производной эллиптической модели для определения признаков распознавания космических объектов.

Ключевые слова: распознавание, космический объект, моделирование, радиолокационное изображение, корреляционная функция.

Введение

Распознавание космических объектов является одной из основных задач системы контроля и мониторинга деятельности иностранных государств в околоземном космическом пространстве [1]. Задача распознавания должна решаться по каждому объекту, находящемуся в околоземном космическом пространстве [2]. Под распознаванием в теории обработки сигналов понимается отнесение наблюдаемого объекта по измеренным координатным (траекторным) и некоординатным (сигнальным) признакам к одному из заранее определенных классов [3].

В настоящее время задача распознавания космических объектов решается с использованием предварительно накопленной каталогизирован-

ной информации, состоящей из координатной информации, некоординатной информации и априорных сведений об объекте. Координатная информация представляет собой сведения о дальности, угловом положении космического объекта и параметрах движения его центра масс. Под некоординатной информацией понимают информацию о форме и структуре внешней поверхности, отражательных и излучательных характеристиках объекта наблюдения и его конструктивных элементов, параметрах стабилизации и ориентации, содержащуюся в параметрах принимаемых от объекта сигналов [4].

Одним из ее видов является видовая информация, представляющая собой изображения наблюдаемой сцены, содержащей космические объекты и фоны. Видовая информация характеризуется

исключительно важными качествами, отличающими ее от других видов некоординатной информации, а именно: наблюдаемостью, компактностью, избыточностью [5]. По имеющимся оценкам [6] с помощью детальных изображений может быть выявлено до 75 % демаскирующих признаков космических объектов.

Распознавание по изображениям может производиться визуально или с применением машинных методов. Наиболее очевидный вариант машинного распознавания реализуется путем корреляционного отождествления получаемых изображений с имеющимися эталонными изображениями для различных классов космических объектов. Однако такой способ требует высоких вычислительных затрат и наличия большого объема памяти. Значительно меньший объем потребуется иметь, если распознавание космических объектов будет вестись не по эталонным изображениям, а по статистическим параметрам этих изображений.

Для получения оптических изображений космических объектов используются наземные оптико-электронные средства, оснащенные адаптивной оптической системой, однако их применение ограничено выполнением условий оптической видимости и наблюдаемости. Системы радиовидения с инверсным синтезированием апертуры антенны позволяют получать детальные радиолокационные изображения (РЛИ) воздушных и космических объектов независимо от времени суток, освещенности, в любых метеорологических условиях [7].

В сравнении с совокупностью одномерных реализаций некоординатной информации, РЛИ содержат гораздо больше информации. По последним можно оценить форму, размеры, параметры движения, отражательные свойства отдельных конструктивных элементов, характеристики рассеяния наблюдаемых объектов. Данная информация может быть использована для формирования признаков распознавания космических объектов.

РЛИ сильно различаются даже при незначительном изменении ракурса объекта наблюдения. В связи с этим для надежного распознавания космических объектов по РЛИ необходимо хранить большое количество эталонных изображений. Получение таких обучающих наборов данных путем натурных испытаний потребует огромных затрат ресурсов, времени и доступности подлинного объекта исследований [8]. Поэтому задача моделирования РЛИ для дальнейшего решения задачи распознавания космических объектов является актуальной.

Постановка задачи

В ходе исследований, представленных в [9], было установлено, что с помощью трех типов линейных дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка можно описать различные по характеру полутонные изображе-

ния, а также была выявлена связь между типом изображения и вероятностными характеристиками модели. Варьируя параметрами исходного стохастического дифференциального уравнения, можно добиться определенной степени адекватности математической модели реальным изображениям как в оптическом, так и в радиодиапазонах. Анализ адекватности моделей реальным РЛИ показал, что параболическая и гиперболическая модели достаточно хорошо описывают изображения участка земной поверхности, а эллиптическая модель – изображения одиночных и групповых объектов.

Для дальнейшего решения задачи распознавания необходимо усовершенствовать существующую математическую модель полутонных изображений в виде уравнения эллиптического типа, провести анализ ее адекватности и определить способ выбора наилучших параметров модели для представления РЛИ космических объектов.

Модель изображений в виде дифференциального уравнения эллиптического типа

Исходя из физических соображений плоское РЛИ можно представить в виде поля значений яркости. Такое поле можно задать функцией трех переменных $u(t, y, x)$, где t – время; y, x – пространственные координаты. Будем полагать, что за время работы системы радиовидения формируемое изображение будет статическим, т.е. для него зависимость функции u от времени t будет отсутствовать. Тогда модель полутонных изображений в виде уравнения эллиптического типа представляет краевую задачу вида [10]:

$$-\left[\frac{\partial^2 u(y, x)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u(y, x)}{\partial x^2}\right] + au(y, x) = n_u(y, x), \quad (1)$$

$$u(0, x) = g_1, \quad u(y, 0) = g_2,$$

$$u(L_k, x) = g_3, \quad u(y, L_c) = g_4,$$

где L_c – длина строки изображения; L_k – длина кадра изображения.

Решение краевой задачи (1) имеет вид [11]:

$$u(y, x) = \frac{4}{L_c L_k} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{m\pi x}{L_c}\right) \sin\left(\frac{l\pi y}{L_k}\right)}{r_{ml}} \times$$

$$\times \left[\int_0^{L_k} \int_0^{L_c} \sin\left(\frac{m\pi \xi}{L_c}\right) \sin\left(\frac{l\pi \eta}{L_k}\right) \times n_u(\xi, \eta) d\xi d\eta + \right. \quad (2)$$

$$\left. \frac{lL_c}{mL_k} \times ((-1)^m - 1) (g_1 + g_3(-1)^l) + \right.$$

$$\left. + \frac{mL_c}{lL_k} ((-1)^l - 1) (g_2 + g_4(-1)^m) \right].$$

Одна из реализаций $u(y, x)$ решения (2) представлена на рисунке 1.

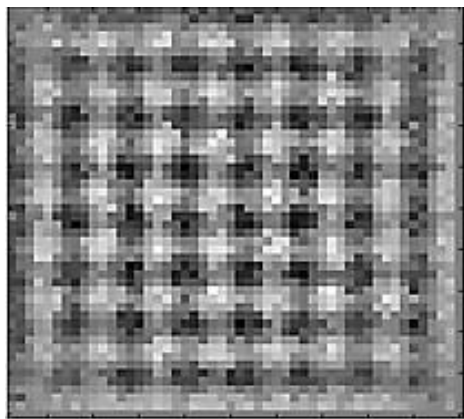


Рис. 1. Реализация $u(y, x)$ решения краевой задачи в виде дифференциального уравнения эллиптического типа

Соответствующие вероятностные характеристики эллиптической модели будут иметь вид:

$$m(y, x) = M\{u(y, x)\} = \frac{lL_c}{mL_k} \times ((-1)^m - 1)(g_1 + g_3(-1)^l) + \frac{mL_c}{lL_k} ((-1)^l - 1)(g_2 + g_4(-1)^m), \quad (3)$$

$$R_u(y_1, x_1, y_2, x_2) = \frac{2N_u}{L_c^2 L_k^2} \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{m\pi x_1}{L_c}\right) \sin\left(\frac{m\pi x_2}{L_c}\right)}{r_{ml}} \times \frac{\sin\left(\frac{l\pi y_1}{L_k}\right) \sin\left(\frac{l\pi y_2}{L_k}\right)}{r_{ml}}, \quad (4)$$

где $R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)$ – корреляционная функция поля $u(y, x)$; $m(y, x)$ – математическое ожидание.

На рисунке 2 представлено сечение нормированной корреляционной функции модели эллиптического типа. Из рисунка видно, что эллиптическая модель является некаузальной по обеим координатам. Более точный выбор модели и ее параметров осуществляется экспериментально путем сравнения статистических характеристик истинного изображения и модели.

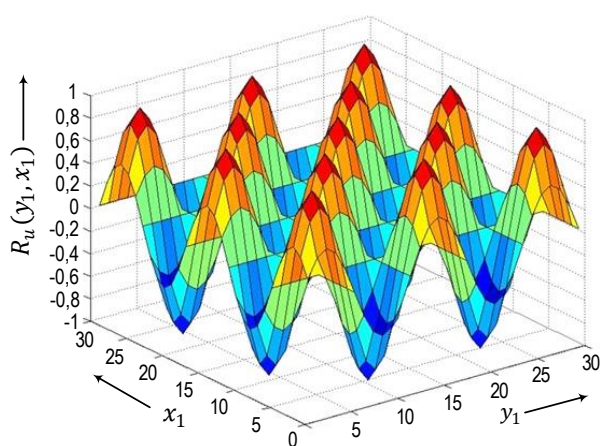


Рис. 2. Сечение нормированной корреляционной функции модели эллиптического типа

Разработка модифицированных РЛИ-моделей на основе дифференцирования исходной модели по пространственным координатам

В работе [12] предложена модифицированная модель РЛИ (далее – РЛИ-модель) в виде уравнения параболического типа [13], предполагающая дифференцирование по пространственным координатам исходной модели. Результаты исследований показали, что математическая модель, представленная в виде смешанной производной параболической модели, обладает наилучшими корреляционными свойствами при описании реальных РЛИ от сантиметрового до метрового диапазонов. Математическая модель, представленная в виде комбинированной производной, хорошо описывает РЛИ в длинноволновых диапазонах (L и P), но в сантиметровом диапазоне значение ошибки возрастает.

На основании результатов, полученных в работе [12], можно предположить, что для описания РЛИ космических объектов возможно использование модифицированных моделей, получаемых в результате дифференцирования по пространственным координатам корреляционной функции исходной эллиптической модели (4).

Рассмотрим два варианта дифференцирования исходной эллиптической модели: первый вариант предполагает моделирование РЛИ в виде смешанной производной от исходного изображения:

$$u^{(yx)}(y, x) = \frac{\partial^2 u(y, x)}{\partial y \partial x}, \quad (5)$$

а второй вариант – в виде комбинированной производной, представляющей собой среднее между производными по одной и по другой координатам:

$$u^{(y+x)}(y, x) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u(y, x)}{\partial x} + \frac{\partial u(y, x)}{\partial y} \right). \quad (6)$$

В [10] показано, что случайное поле $u(y, x)$, задаваемое линейными стохастическими дифференциальными уравнениями в частных производных второго порядка, имеет гауссовское распределение. В данном случае исчерпывающей вероятностной характеристикой является корреляционная функция:

$$R_u(y_1, x_1, y_2, x_2) = M\{(u(y_1, x_1) - m(y_1, x_1)) \times (u(y_2, x_2) - m(y_2, x_2))\}, \quad (7)$$

где $M\{\cdot\}$ – операция математического ожидания; $m(y, x)$ – математическое ожидание случайного поля $u(y, x)$.

Используя предложенные преобразования (5), (6) и определение корреляционной функции (7) получим функциональные аналитические зависимости между корреляционной функцией модели исходного изображения R_u и корреляционными функциями моделей дифференцированных РЛИ $R_u^{(yx)}$, $R_u^{(y+x)}$:

$$R_u^{(yx)}(y_1, x_1, y_2, x_2) = \frac{\partial^4 R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)}{\partial y_1 \partial x_1 \partial y_2 \partial x_2}, \quad (8)$$

$$R_u^{(y+x)}(y_1, x_1, y_2, x_2) = \frac{1}{4} \left(\frac{\partial^2 R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial^2 R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)}{\partial y_1 \partial x_2} + \frac{\partial^2 R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)}{\partial x_1 \partial y_2} + \frac{\partial^2 R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)}{\partial y_1 \partial y_2} \right). \quad (9)$$

В результате дифференцирования корреляционной функции модели эллиптического типа (4) по вариантам дифференцирования (8) и (9) получим выражения корреляционных функций эллиптической РЛИ-модели смешанного и комбинированного типов.

Эллиптическая РЛИ-модель смешанного типа:

$$\frac{\partial R_u^{(yx)}(y_1, x_1, y_2, x_2)}{\partial y_1 \partial x_1 \partial y_2 \partial x_2} = \frac{N_u \pi^4}{L_k^4 L_c^4} \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{m^2 l^2}{r_{ml}^2} \times \cos\left(\frac{m\pi x_1}{L_c}\right) \times \cos\left(\frac{m\pi x_2}{L_c}\right) \times \cos\left(\frac{m\pi y_1}{L_c}\right) \times \cos\left(\frac{m\pi y_2}{L_c}\right). \quad (10)$$

Эллиптическая РЛИ-модель комбинированного типа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)}{\partial x_1 \partial x_1} &= \frac{N_u \pi^2}{L_k^4 L_c^2} \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{m^2}{r_{ml}^2} \times \cos\left(\frac{m\pi x_1}{L_c}\right) \times \cos\left(\frac{m\pi x_2}{L_c}\right) \times \sin\left(\frac{m\pi y_1}{L_c}\right) \times \sin\left(\frac{m\pi y_2}{L_c}\right). \\ \frac{\partial R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)}{\partial y_1 \partial x_2} &= \frac{N_u \pi^2}{L_k^3 L_c^3} \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{ml}{r_{ml}^2} \times \sin\left(\frac{m\pi x_1}{L_c}\right) \times \cos\left(\frac{m\pi x_2}{L_c}\right) \times \cos\left(\frac{m\pi y_1}{L_c}\right) \times \sin\left(\frac{m\pi y_2}{L_c}\right). \\ \frac{\partial R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)}{\partial x_1 \partial y_2} &= \frac{N_u \pi^2}{L_k^3 L_c^3} \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{ml}{r_{ml}^2} \times \cos\left(\frac{m\pi x_1}{L_c}\right) \times \sin\left(\frac{m\pi x_2}{L_c}\right) \times \sin\left(\frac{m\pi y_1}{L_c}\right) \times \cos\left(\frac{m\pi y_2}{L_c}\right). \\ \frac{\partial R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)}{\partial y_1 \partial y_1} &= \frac{N_u \pi^2}{L_k^2 L_c^4} \times \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{l^2}{r_{ml}^2} \times \sin\left(\frac{m\pi x_1}{L_c}\right) \times \sin\left(\frac{m\pi x_2}{L_c}\right) \times \cos\left(\frac{m\pi y_1}{L_c}\right) \times \cos\left(\frac{m\pi y_2}{L_c}\right). \end{aligned} \quad (11)$$

Анализ адекватности исходной и модифицированных эллиптических моделей реальным РЛИ проведем на основе сравнения их корреляционных функций со статистической корреляционной функцией реального РЛИ методом наименьших квадратов [14], путем минимизации среднего квадрата ошибки ε по параметрам моделей a [10]:

$$\varepsilon = \min_a \left[\sum_{y_1, x_1, y_2, x_2} \left(R_0(y_1, x_1, y_2, x_2) - R_u(y_1, x_1, y_2, x_2) \right)^2 \right], \quad (12)$$

где $R_0(y_1, x_1, y_2, x_2)$ – статистическая корреляционная функция РЛИ; $R_u(y_1, x_1, y_2, x_2)$ – корреляционная функция математической модели РЛИ.

В ходе моделирования на базе радиолокационного измерительного комплекса «Цунами-3» ВКА им. А.Ф. Можайского в безэховой камере были сформированы РЛИ натурной модели космического аппарата (КА) SkySat-1 в X-диапазоне ($\lambda = 3,5$ см) при различных ракурсах [15].

На рисунке 3а представлен внешний вид КА SkySat-1, а на рисунке 3б – его натурная модель на опорно-поворотном устройстве. На рисунке 4 представлены сформированные при различных ракурсах РЛИ натурной модели КА SkySat-1.

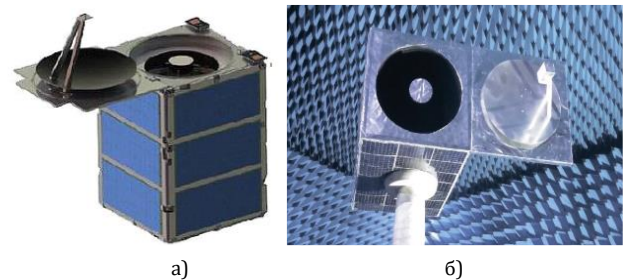


Рис. 3. Внешний вид КА SkySat-1 (а) и его натурная модель на опорно-поворотном устройстве (б)

В качестве статистической характеристики РЛИ используем следующее определение пространственной корреляционной функции [12]:

$$R_0(y_1, x_1, y_2, x_2) = \frac{1}{I} \sum_i (u_i(y_1, x_1) - \vartheta(y_1, x_1)) \times (u_i(y_2, x_2) - \vartheta(y_2, x_2)), \quad (13)$$

где $\vartheta(y, x) = M\{u_i(y, x)\}$, $n = \overline{1, I}$, $u_i(y, x)$ – нормированное значение «яркости» -го РЛИ из выборки размера I изображений, полученных преимущественно с одного ракурса при малых качаниях модели; $M\{u_i(y, x)\}$ – операция усреднения по всему множеству I изображений, используемых при статистической обработке.

Для определения статистической корреляционной функции используем РЛИ натурной модели КА SkySat-1 размером 30×30 пкс, полученное с ракурса $\varphi = -7,5^\circ$ (рисунок 4б), обучающую выборку сформируем путем вращения данного РЛИ вокруг своей оси на 360° , $I = 1000$.

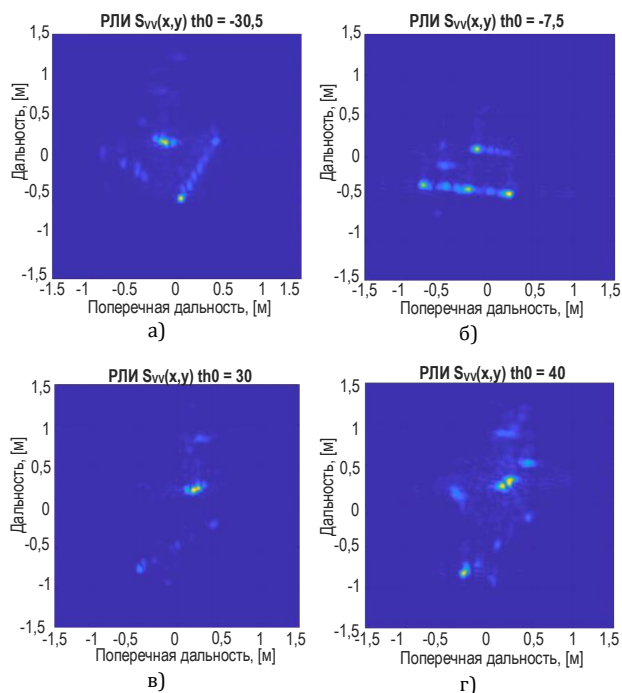


Рис. 4. РЛИ натурной модели КА SkySat-1, сформированные при различных ракурсах

Для визуального восприятия четырехмерной статистической корреляционной функции реального РЛИ представлено ее сечение при $y^2 = 15$, $x^2 = 15$ (рисунок 5).

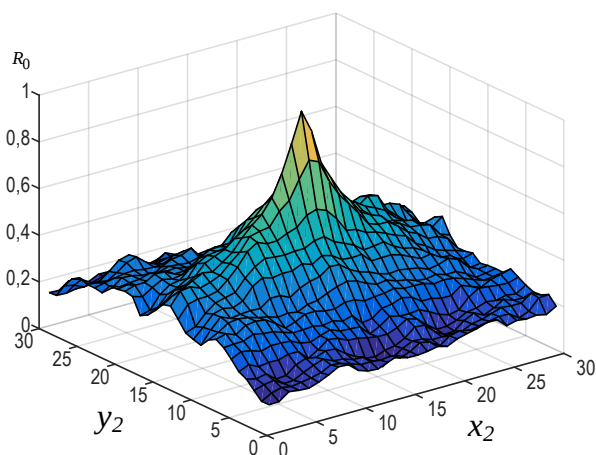


Рис. 5. Сечение статистической корреляционной функции РЛИ (ракурс $\varphi = -7,5^\circ$) натурной модели КА SkySat-1 при $y^2 = 15$, $x^2 = 15$

На рисунке 6 представлены сечения корреляционных функций при $y^2 = 15$, $x^2 = 15$ модели эллиптического типа (рисунок 6а), смешанной производной модели эллиптического типа (рисунок 6б) и комбинированной производной модели эллиптического типа (рисунок 6в) при фиксированных значениях параметра a .

В таблице 1 приведены результаты минимизации среднего квадрата ошибки ε (12) для РЛИ X -диапазона при использовании исходной эллиптической модели (ε_0), ее смешанной (ε_{yx}) и комбинированной производной (ε_{y+x}).

ТАБЛИЦА 1. Результаты минимизации среднего квадрата ошибки (СКО) ε для РЛИ X -диапазона

Диапазон длин волн, см	Минимальный СКО		
	ε_0	ε_{yx}	ε_{y+x}
$\lambda = 2,5 - 3,75$	5,3 при $a = 0,11$	2,4 при $a = 1,02$	3,6 при $a = 0,3$

Из таблицы 1 видно, что математическая модель, представленная в виде смешанной производной, обладает наилучшими корреляционными свойствами при описании реальных РЛИ космических объектов, об этом также можно судить по визуальному представлению сечений корреляционных функций для трех типов моделей (см. рисунок 6).

Для проверки гипотезы о возможности использования модифицированной эллиптической РЛИ-модели при построении дескриптивных признаков распознавания космического объекта проведем эксперимент по различению его четырех разных типов. На рисунке 7 представлены тестовые РЛИ четырех разных типов объектов, полученные в X -диапазоне с одного ракурса наблюдения ($\varphi = 30^\circ$).

Соответствующие данным РЛИ графики усредненных корреляционных функций при минимальных значениях СКО приведены на рисунке 8.

В таблице 2 приведены значения СКО при наилучшем параметре смешанной производной эллиптической модели для тестовых РЛИ четырех разных типов космических объектов, представленных на рисунке 7.

ТАБЛИЦА 2. Значения СКО при наилучшем параметре смешанной производной эллиптической модели для тестовых РЛИ космических объектов (при $\varphi = 30^\circ$)

Тип тестового РЛИ	Параметр модели	$\varepsilon_{\min}$, %
РЛИ Envisat (рисунок 7а)	$a = 1,13$	2,43
РЛИ КА Rosat (рисунок 7б)	$a = 1,38$	2,57
РЛИ КА Midori-2 (рисунок 7в)	$a = 1,17$	2,14
РЛИ МКС (рисунок 7г)	$a = 1,56$	2,75

После проведенного анализа полученных результатов можно сделать вывод о существовании зависимости статистической корреляционной функции РЛИ от формы космического объекта. Об этом также можно судить по визуальному представлению графиков усредненных корреляционных функций, соответствующих РЛИ космических объектов разных типов (рисунок 8).

Также в таблице 2 приведены полученные значения параметра a смешанной производной эллиптической модели при минимальном СКО, которые принимают различные значения для РЛИ космических объектов разных типов. Это подтверждает гипотезу о возможности использования значений параметра смешанной производной эллиптической модели РЛИ и соответствующих ракурсов наблюдения в качестве дескриптивных признаков для распознавания космических объектов.

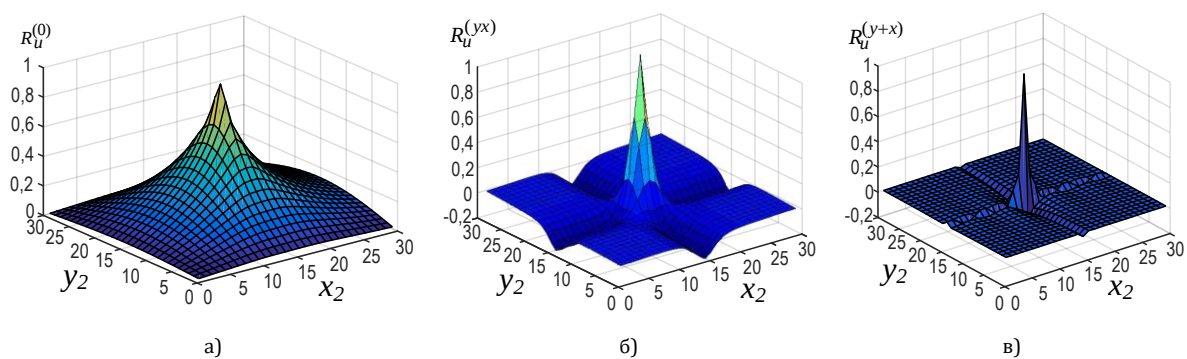


Рис. 6. Сечения корреляционных функций при $y_2 = 15, x_2 = 15$: а) эллиптической модели; б) смешанной производной модели эллиптического типа; в) комбинированной производной модели эллиптического типа

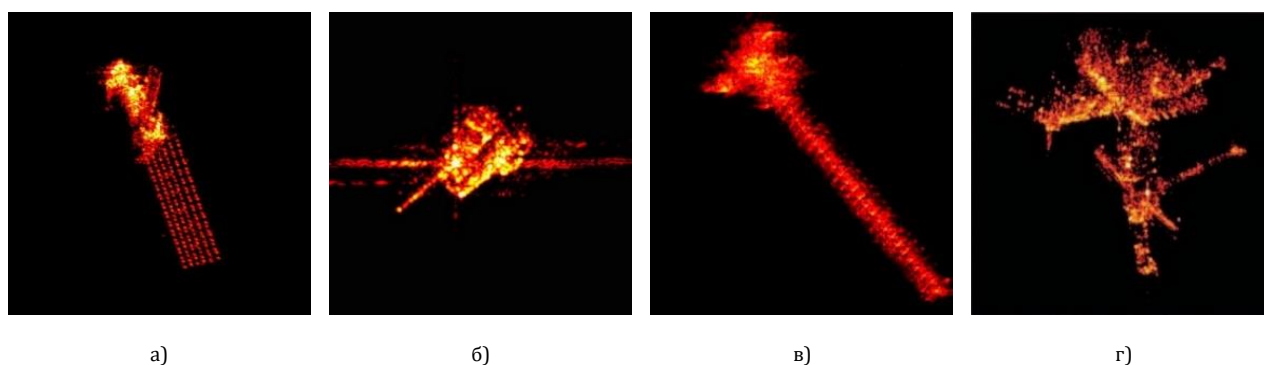


Рис. 7. Тестовые РЛИ четырех разных типов КО, полученные в X диапазоне: а) Envisat; б) Rosat; в) Midori-2; г) МКС

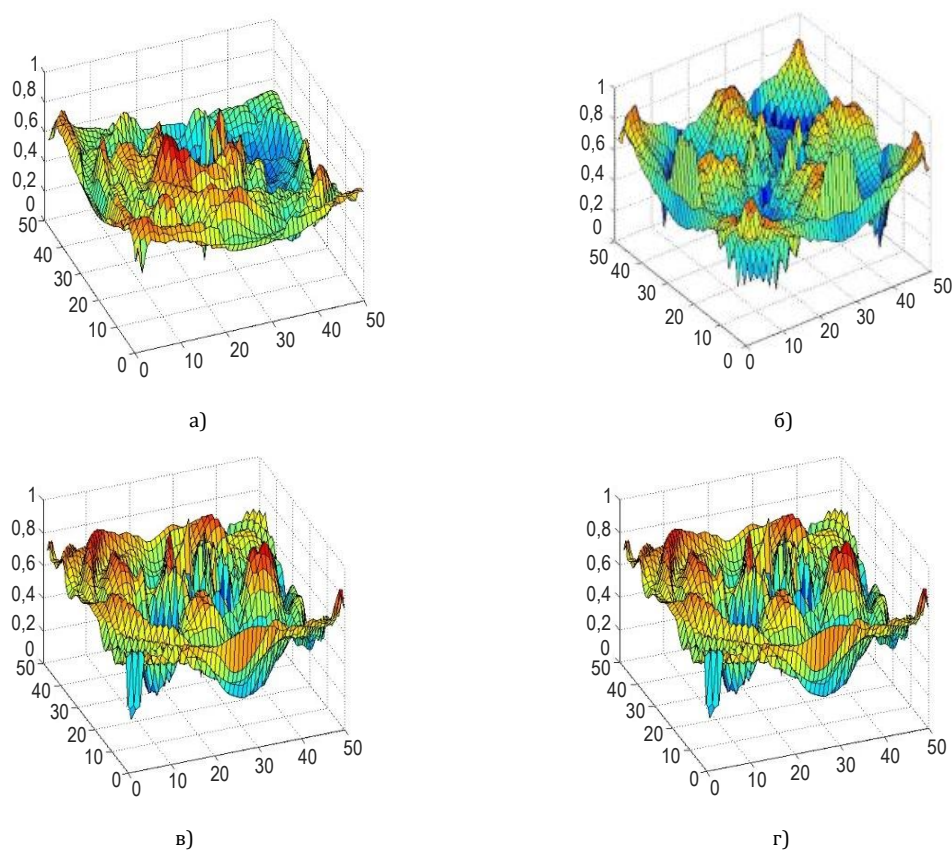


Рис. 8. Графики усредненных корреляционных функций, соответствующие тестовым РЛИ четырех разных типов КА: а) Envisat, б) Rosat, в) Midori-2, г) МКС

Заключение

Таким образом, результаты моделирования показали возможность использования дифференцированных математических моделей для описания реальных РЛИ космических объектов. Для такого описания наиболее подходящей является математическая модель, представленная в виде смешанной производной эллиптической модели. Варьируя параметром ее смешанной производной при достижении минимального значения СКО, можно добиться значительной степени адекватности мате-

матической модели реальному изображению. Использование математических моделей РЛИ для определения признаков распознавания космических объектов позволит значительно сократить требуемый объем памяти, так как вместо хранения реальных эталонных изображений для различных ракурсов достаточно будет хранить только значения параметра выбранных математических РЛИ-моделей и соответствующие им ракурсы объектов.

Список используемых источников

1. Гудаев Р.А., Королев В.О., Рогов Д.А., Шалдаев С.Е. Математическая модель функционирования системы распознавания // Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2016. № 655. С. 150–156.
2. Алдохина В.Н., Коломийцев Е.Г., Бабишкин А.А. и др. Наблюдение и измерение характеристик космических объектов: учебное пособие. СПб.: Изд-во ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. 128 с.
3. Полетаев А.М., Коротин А.А., Якимов В.Л. Радиотехнические цепи и сигналы. Статистическая радиотехника и радиотехника: практикум. СПб.: Изд-во ВКА им. А.Ф. Можайского, 2012. 159 с.
4. Корякин А.В., Лутов И.О. Распознавание космических объектов по разнородной видовой информации. СПб.: Изд-во ВИКА им. А.Ф. Можайского, 2000. 115 с.
5. Яшин В.В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы. М.: Машиностроение, 1994. 112 с.
6. Мальцев Г.Н., Лобанов А.Г., Лисогуб В.И. Алгоритмы адаптивного восстановления изображений и результаты их имитационного моделирования // Труды военно-научной конференции (Санкт-Петербург, Россия, 21–23 марта 1995). СПб: МО РФ, 1996. Т. 2. С. 88–90.
7. Верб В.С., Татарский А.Р. Радиолокационные системы авиационно-космического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства. М.: Радиотехника. 2014. 576 с.
8. Жердев Д.А., Минаев Е.Ю., Прокудин В.В., Фурсов В.А. Технология распознавания радиолокационных изображений с формированием эталонов путем моделирования // III Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии (ИТНТ-2017)»: сборник трудов (Самара, Россия, 25–27 апреля 2017). Самара: СНИУ, 2017. С. 1033.
9. Коренной А.В. Математические модели полутонных изображений // Радиотехника. 2007. № 8. С. 79–81.
10. Коренной А.В., Лепёшкин С.А., Кадочников А.П., Яценко Е.А. Моделирование радиолокационных изображений на основе стохастических дифференциальных уравнений в частных производных // Радиотехника. 2016. № 10. С. 134–144.
11. Завьялов А.М., Карасева Р.Б. Уравнения математической физики и приближенные методы решений дифференциальных уравнений: учебное пособие. Омск: Изд-во СибАДИ, 2002. 124 с.
12. Коренной А.В., Лепёшкин С.А., Яценко Е.А., Мишуков О.А. Модифицированная модель радиолокационных изображений // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22. № 6. С. 19–25.
13. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Изд-во МГУ, 1999. 799 с.
14. Горяинов В.Б., Павлов И.В., Цветкова Г.М. и др. Математическая статистика: учебник для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 424 с.
15. Казанцев А.А., Перов Д.А., Самородов А.А., Самородов Б.А. Алгоритм формирования радиолокационных изображений космических аппаратов со сверхразрешением на основе комплексирования спектрального оценивания и продолженной когерентной обстановки // Ural Radio Engineering Journal. 2018. Vol. 2. Iss. 2. PP. 67–86. DOI:10.15826/urej.2018.2.2.005

* * *

PATTERN RADAR IMAGES FORMATION'S LIKE A STOCHASTIC DIFFERENTIAL EQUATIONS FOR RECOGNITION OF SPACE OBJECTS

A. Kadochnikov¹, A. Kazantsev¹, O. Mishukov¹, S. Shigorev¹

¹Mozhaisky Military Space Academy,
St. Petersburg, 197198, Russian Federation

Article info

The article was received 29th July 2019

For citation: Kadochnikov A., Kazantsev A., Mishukov O., Shigorev S. Pattern Radar Images Formation's Like a Stochastic Differential Equations for Recognition of Space Objects. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(4):106–113. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-106-113>

Abstract: *The resource problems of the traditional use of detailed radar images for reliable recognition of space objects are shown. The urgent task of forming a new type of model of radar images of space objects to determine the signs of their recognition is posed. Corresponding mathematical models of such images based on stochastic differential equations of elliptic type are presented. The adequacy of the developed models to the real radar images of a space object was assessed. It is established that for the description of radar images of space objects the most suitable is a modified model in the form of a mixed derivative of an elliptical model. To test the hypothesis about the possibility of using the radar image model when constructing descriptive recognition signs, an experiment was conducted to distinguish four different types of space objects. The experimental results showed the possibility of using a mixed derivative of the elliptical model to determine signs of recognition of space objects.*

Keywords: *Recognition, space object, modeling, radar image, correlation function.*

References

1. Gudaev R.A., Korolev V.O., Rogov D.A., Shaldaev S.E. Matematicheskaya model funkcionirovaniia sistemy raspoznavaniia [The Mathematical Model of the Functioning of the Recognition System]. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*. 2016;655:150–156. (in Russ.)
2. Aldokhina V.N., Kolomytsev E.G., Babishkin A.A. et al. *Nablyudeniye i izmereniye kharakteristik kosmicheskikh obektov: uchebnoye posobie* [Observation and Measurement of Characteristics of Space Objects]. Saint Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy Publ.; 2012. 128 p. (in Russ.)
3. Poletaev A.M., Korotin A.A., Yakimov V.L. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly. Statisticheskaya radiotekhnika i radioinformatika: praktikum* [Radio Circuits and Signals. Statistical Radio Engineering and Radio Informatics: Workshop]. Saint Petersburg: Mozhaisky Military Space Academy Publ.; 2012. 159 p. (in Russ.)
4. Koryakin A.V., Lutov I.O. *Raspoznavaniye kosmicheskikh obektov po raznorodnoi vidovoi informatsii* [Recognition of Space Objects by Heterogeneous Species Information]. Saint Petersburg: Mozhaisky Military Engineering and Space Academy Publ.; 2000. 115 p. (in Russ.)
5. Yashin V.V. *Analiz i obrabotka izobrazhenii: printsipy i algoritmy* [Image Analysis and Processing: Principles and Algorithms]. Moscow: Mashinostroeniye Publ.; 1994. 112 p. (in Russ.)
6. Mal'tsev G.N., Lobanov A.G., Lisogub V.I. Algoritmy adaptivnogo vosstanovleniya izobrazheniy i rezultaty ikh imitatsionnogo modelirovaniia [Adaptive Image Recovery Algorithms and the Results of their Simulation]. *Trudy voenno-nauchnoy konferentsii, 21–23 marta 1995, Saint-Petersburg, Russia* [Proceedings of the Military Scientific Conference, 21–23 March 1995, St. Petersburg, Russia]. Saint Petersburg: Ministry of Defense of the Russian Federation Publ; 1996. vol. 2. p. 88–90. (in Russ.)
7. Verba V.S., Tatarskiy A.R. *Radiolokatsionnye sistemy aviatsionno-kosmicheskogo monitoringa zemnoi poverkhnosti i vozdushnogo prostranstva* [Radar Systems for Aerospace Monitoring of the Earth's Surface and Airspace]. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2014. 576 p. (in Russ.)
8. Zherdev D.A., Minaev E.Y., Prokudin V.V., Fursov V.A. Tekhnologiya raspoznavaniya radiolokatsionnykh izobrazhenii s formirovaniem etalonov putem modelirovaniia [Recognition Technology for Radar Images with the Formation of Standards by Modeling]. *III Mezhdunarodnaya konferentsiya i molodezhnaya shkola Informatsionnye tekhnologii i nanotekhnologii ITNT-2017: sbornik trudov, 25–27 aprelya 2017, Samara, Rossiya* [Proceedings of the III International Conference and Youth School "Information Technologies and Nanotechnologies, ITNT-2017", 25–27 April 2017, Samara, Russia]. Samara: Samara University Publ.; 2017. p.1033. (in Russ.)
9. Korennoy A.V. Mathematical Models of Half-Tone Images. *Radiotekhnika*. 2007;8:79–81. (in Russ.)
10. Korennoy A.V., Lepeshkin S.A., Kadochnikov A.P., Yashchenko E.A. Modeling of radar images based on stochastic differential equations in partial derivatives. *Radiotekhnika*. 2016;10:134–145. (in Russ.)
11. Zavyalov A.M., Karaseva R.B. *Uravneniya matematicheskoi fiziki i priblizhennyye metody resheniya differentsialnykh uravneniy: uchebnoye posobie* [Equations of Mathematical Physics and Approximate Methods for Solving Differential Equations]. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University Publ.; 2002. 124 p. (in Russ.)
12. Korennoy A.V., Lepeshkin S.A., Yashchenko E.A., Mishukov O.A. The modified model of radar images. *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. 2017;22(6):19–25. (in Russ.)
13. Tixonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoi fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Moscow: Lomonosov Moscow State University Publ.; 1999. 799 p. (in Russ.)
14. Goryainov V.B., Pavlov I.V., Tsvetkova G.M., et al. *Matematicheskaya statistika: uchebnoye dlya vuzov* [Math statistics]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 2001. 424 p. (in Russ.)
15. Kazantsev, A.A. Perov D.A., Samorodov A.A., Samorodov B.A. Super resolution algorithm for satellites inverse synthetic aperture radar imaging. *Ural Radio Engineering Journal*. 2018;2(2):67–86. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.15826/urej.2018.2.2.005>