

УДК 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.89

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ КРОМКИ ЗЕМЛЯ-МОРЕ

В. И. Исаков^а, канд. техн. наук, доцент**Д. А. Шепета^а**, канд. техн. наук, доцент^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Введение: математические модели эхо-сигналов от подстилающих поверхностей земли и моря необходимы при синтезе и анализе работы бортовых локаторов летательных аппаратов, осуществляющих поиск, обнаружение и сопровождение объектов. В этих случаях эхо-сигналы являются помехой, на фоне которой и происходят выделение и обработка информационных сигналов. При аппроксимации плотности распределения вероятностей амплитуды отраженного сигнала многие исследователи используют плотность распределения Рэлея. Для аппроксимации распределения амплитуд сигналов, отраженных подстилающей поверхностью, при исследовании характеристик высокоточных локаторов используют логарифмически-нормальную плотность распределения, плотность распределения Вейбулла, составные распределения и некоторые другие плотности распределения. **Цель исследования:** разработка универсального алгоритма моделирования флюктуаций локационных сигналов, отраженных от кромки земля-море. **Результаты:** получен алгоритм моделирования, позволяющий моделировать флюктуации сигнала, отраженного от кромки земля-море. В качестве законов распределения амплитуд и мощностей сигналов, отраженных от подстилающих поверхностей, использованы логарифмически-нормальный закон для отражений от морской поверхности и закон распределения Вейбулла для отражений от земной поверхности. Методика синтеза алгоритма позволяет использовать и другие законы распределения. Алгоритмы моделирования сигналов, отраженных земной и морской поверхностями, являются частными случаями представленного алгоритма. **Практическая значимость:** алгоритм может использоваться при отработке аппаратуры, осуществляющей картографирование береговой линии, а также для отработки режимов взлета-посадки гидросамолетов вблизи портов.

Ключевые слова — модель, локационный сигнал, кромка земля-море.

Введение

Одним из наиболее эффективных методов исследования сложных нелинейных систем управления является метод математического моделирования систем на ЭВМ, в частности метод имитационного моделирования. При этом исследовании необходимо реализовать на ЭВМ не только алгоритм функционирования самой системы управления, но синтезировать и реализовать алгоритмы имитации информационных и мешающих входных сигналов системы. Задача синтеза математических моделей входных сигналов оказывается зачастую даже более сложной, чем реализация алгоритма функционирования исследуемой системы. Это прежде всего связано с тем, что входные сигналы (как информационные, так и мешающие) являются случайными, а в качестве их математических моделей используют случайные нестационарные негауссовы процессы [1, 2]. В данной работе рассмотрены особенности моделирования локационных сигналов, отраженных от кромки земля-море.

Основные характеристики сигналов, отраженных от подстилающих поверхностей земли и моря

Математические модели эхо-сигналов от подстилающих поверхностей земли и моря необхо-

димы при синтезе и анализе работы бортовых локаторов летательных аппаратов, осуществляющих поиск, обнаружение и сопровождение объектов. В этих случаях эхо-сигналы являются помехой, на фоне которой и происходит выделение и обработка информационных сигналов. В случае картографирования, в частности спутникового, сигналы от подстилающих поверхностей являются информационными, при этом особое значение приобретают задачи картографирования береговой зоны и, соответственно, определения координат кромки земля-море. В настоящей работе предлагается математическая модель эхо-сигналов кромки земля-море и рассматриваются особенности моделирования этих сигналов.

Локационный сигнал, отраженный от протяженного объекта, в частности от земной или морской поверхности, является случайным процессом. При импульсном режиме локации этот сигнал, наблюдаемый в стробе дальности приемного устройства локатора, представляет собой отрезки случайного узкополосного процесса. Импульсы, отраженные от подстилающей поверхности, характеризуются плотностью распределения вероятностей амплитуды A или мощности P , а также спектрально-корреляционными характеристиками. Мощность флюктуаций P пропорциональна эффективной площади рассеяния облучаемого участка подстилающей поверхности, которая, в свою очередь, прямо пропорциональна удель-

ной отражающей способности «засвечиваемого» локатором участка поверхности и площади этого участка, попадающей в элемент разрешения. Эффективная площадь рассеяния — площадь идеальной площадки, помещенной в точке расположения отражающего объекта перпендикулярно падающему потоку энергии, изотропно рассеивающей всю падающую на нее энергию и при этом создающей в точке приема такую же плотность потока мощности, как и реальный отражающий объект [3].

При аппроксимации плотности распределения вероятностей амплитуды отраженного сигнала многие исследователи используют плотность распределения Рэлея, ссылаясь на тот факт, что в элемент разрешения попадает множество независимых отражателей, которые в силу центральной предельной теоремы «обеспечивают» нормальность квадратур отраженного сигнала, что и приводит к рэлеевскому распределению амплитуд, причем это распределение используется для сигналов, отраженных и морской поверхностью, и от земли. Подобная аппроксимация допустима лишь тогда, когда разрешающая способность локатора невелика. В этом случае «засвечиваемая» площадь значительна, особенно на больших дальностях, и подобная модель приемлема. Однако для современных высокоточных локаторов, локаторов с высоким разрешением, условия центральной предельной теоремы не выполняются, в силу чего распределение амплитуд отличается от рэлеевского, что и подтверждается многочисленными экспериментальными данными.

Для аппроксимации распределения амплитуд сигналов, отраженных подстилающей поверхностью, при исследовании характеристик высокоточных локаторов используют логарифмически-нормальную плотность распределения, плотность распределения Вейбулла, составные распределения и некоторые другие плотности распределения, например, K -распределение, логарифмическое распределение Вейбулла и т. п. При этом наиболее часто для аппроксимации отражений от морской поверхности используют логарифмически-нормальную плотность, а для отражений от земной поверхности — распределение Вейбулла, поскольку эти распределения не противоречат экспериментальным данным и достаточно просты при их использовании как в теоретических выкладках, так и при синтезе алгоритмов моделирования флуктуаций эхосигналов подстилающих поверхностей.

Распределение Рэлея является частным случаем распределения Вейбулла, но традиционно его рассматривают независимо от распределения Вейбулла, поэтому ниже рассмотрим три распределения.

Отражения от моря и от поверхности земли. Распределение Рэлея

В тех случаях, когда используют модель подстилающей поверхности в виде множества совместно независимых отражающих элементов, случайно распределенных в элементе разрешения, плотность распределения вероятностей амплитуды отраженного сигнала, как отмечено выше, подчиняется закону Рэлея. Это распределение используется для моделирования флуктуаций амплитуд локационного сигнала, отраженного от поверхности земли и от морской поверхности. Распределение Рэлея запишем в виде

$$f(U) = \frac{A}{\sigma_A^2} \exp\left[-\frac{A^2}{2\sigma_A^2}\right], \quad (1)$$

где A — амплитуда отраженного сигнала; σ^2 — параметр распределения. Числовые характеристики распределения: математическое ожидание, дисперсия и коэффициент вариации — определяются выражениями

$$M(A) = \sigma_A \sqrt{\frac{\pi}{2}}; \quad (2)$$

$$D(A) = \sigma_A^2 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right); \quad (3)$$

$$K_A = \frac{\sqrt{D(A)}}{M(A)} \approx 0,52. \quad (4)$$

Плотность мощности результирующего сигнала связана с плотностью распределения вероятностей амплитуды соотношением

$$P = \frac{A^2}{2}, \quad (5)$$

в котором, для согласования размерностей, традиционно полагают, что мощность выделяется на сопротивлении 1 Ом, однако этот размерный коэффициент в соотношении (5) не входит. Данное соглашение (по согласованию размерности) позволяет рассматривать P и A как безразмерные величины, это же относится и к параметрам закона.

Из выражения (5) следует, что мощность P отраженного сигнала распределена по экспоненциальному закону

$$f(P) = \frac{1}{\tilde{P}} \exp\left[-\frac{P}{\tilde{P}}\right] = \frac{1}{\sigma_A^2} \exp\left[-\frac{P}{\sigma_A^2}\right], \quad (6)$$

где $\tilde{P} = \sigma_A^2$ — средняя мощность отраженного сигнала.

Числовые характеристики экспоненциально-го закона: математическое ожидание, дисперсия и коэффициент вариации — определяются выражениями

$$M(P) = \tilde{P}; \quad (7)$$

$$D(P) = \tilde{P}^2; \quad (8)$$

$$K_P = 1. \quad (9)$$

Средняя мощность отраженного сигнала \tilde{P} определяется по известному уравнению радиолокации, которое здесь не приводится, поскольку в него входят не только характеристики облучаемой поверхности, но и характеристики локатора и условия наблюдения подстилающей поверхности. Определив \tilde{P} , мы тем самым определим параметр $\sigma_A^2 = \tilde{P}$ распределения амплитуд отраженного сигнала, и по выражению (1) теперь легко синтезировать соответствующий алгоритм моделирования.

Существенным ограничением рассмотренной модели является постоянство коэффициента вариации, который на практике может меняться в широких пределах. Логарифмически-нормальное распределение и распределение Вейбулла (кроме экспоненциального и рэлеевского, являющихся частными случаями распределения Вэйбулла) свободны от этого ограничения.

Отражения от морской поверхности. Логарифмически-нормальное распределение

Логарифмически-нормальное распределение вероятности амплитуд в нашем случае удобно записать в следующем виде:

$$f(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A A} \exp\left[-\frac{(\ln A - \ln \bar{A})^2}{2\sigma_A^2}\right], \quad (10)$$

где σ_A и $\ln \bar{A}$ — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием, дисперсией и коэффициентом вариации соотношениями

$$M(A) = \bar{A} \exp\left(\frac{\sigma_A^2}{2}\right); \quad (11)$$

$$D(A) = \bar{A}^2 \exp(\sigma_A^2) (\exp(\sigma_A^2) - 1); \quad (12)$$

$$K_A = \sqrt{\exp(\sigma_A^2) - 1}. \quad (13)$$

Это распределение обладает следующим полезным свойством: при возведении случайной величины, распределенной по логарифмически-нор-

мальной плотности, в любую степень полученная случайная величина также имеет логарифмически-нормальное распределение. Осуществляя преобразование (4), получаем логарифмически-нормальное распределение мощности

$$f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_P P} \exp\left[-\frac{(\ln P - \ln \bar{P})^2}{2\sigma_P^2}\right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(2\sigma_A)P} \exp\left[-\frac{\left(\ln P - \ln \frac{\bar{A}^2}{2}\right)^2}{2(2\sigma_A)^2}\right], \quad (14)$$

где σ_P и \bar{P} — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием, дисперсией и коэффициентом вариации соотношениями, аналогичными (11)–(13), при замене в них A (включая индексы) на P .

Из выражения (13) получаем соотношения, связывающие параметры плотностей распределений мощностей и амплитуд:

$$\sigma_P = 2\sigma_A; \quad (15)$$

$$\bar{P} = \frac{\bar{A}^2}{2}. \quad (16)$$

Для определения параметров распределений для конкретных условий наблюдения морской поверхности необходимо определить параметры распределений через среднюю мощность отражений \tilde{P} , аналогично тому, как это было сделано выше для рэлеевского распределения, и коэффициент вариации мощности K_P . Из выражений (11)–(13), (15), (16), используя методику, изложенную в работе [4], получаем

$$\sigma_P = \sqrt{\ln(1 + K_P^2)}; \quad (17)$$

$$\bar{P} = \frac{\tilde{P}}{\sqrt{\ln(1 + K_P^2)}}; \quad (18)$$

$$\sigma_A = \frac{\sigma_P}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\ln(1 + K_P^2)}; \quad (19)$$

$$\bar{A} = \sqrt{2\bar{P}} = \frac{\sqrt{2\tilde{P}}}{\sqrt[4]{\ln(1 + K_P^2)}}. \quad (20)$$

Средняя мощность отраженного сигнала \tilde{P} определяется по известному уравнению радиолокации, которое позволяет учесть и характери-

стики локатора, и условия наблюдения поверхности моря, и состояние морской поверхности [3, 5]. Выражение для коэффициента вариации для разных условий поверхности моря, ее состояния и параметров локатора приведено в работе [6].

**Отражения от земной поверхности.
Распределение Вейбулла**

Распределение Вейбулла для амплитуд запишем в следующем виде:

$$f(A) = \alpha_A \lambda_A A^{\alpha_A - 1} \exp(-\lambda_A A^{\alpha_A}), \quad (21)$$

где α_A , λ_A и σ_A — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием, дисперсией и коэффициентом вариации соотношениями

$$M(A) = \frac{1}{\alpha_A} \lambda_A^{\frac{1}{\alpha_A}} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha_A}\right); \quad (22)$$

$$D(A) = \lambda_A^{\frac{2}{\alpha_A}} \left[\frac{2}{\alpha_A} \Gamma\left(\frac{2}{\alpha_A}\right) - \frac{1}{\alpha_A^2} \Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha_A}\right) \right]; \quad (23)$$

$$K_A = \sqrt{2\alpha_A \frac{\Gamma\left(\frac{2}{\alpha_A}\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha_A}\right)} - 1}, \quad (24)$$

где $\Gamma(\cdot)$ — гамма-функция.

Это распределение, так же как и логарифмически-нормальное распределение, обладает свойством: при возведении случайной величины, распределенной по закону Вейбулла в любую степень, полученная случайная величина имеет распределение Вейбулла. Осуществляя преобразование (5), получаем соответствующее распределение мощности

$$\begin{aligned} f(P) &= \alpha_P \lambda_P P^{\alpha_P - 1} \exp(-\lambda_P P^{\alpha_P}) = \\ &= \left(\frac{\alpha_A}{2}\right) \left(\lambda_A 2^{\frac{\alpha_A}{2}}\right) P^{\left(\frac{\alpha_A}{2}\right) - 1} \times \\ &\times \exp\left[-\left(\lambda_A 2^{\frac{\alpha_A}{2}}\right) P^{\left(\frac{\alpha_A}{2}\right)}\right], \quad (25) \end{aligned}$$

где α_P и λ_P — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием, дисперсией и коэффициентом вариации соотношениями, аналогичными (22)–(24), при замене в них A (включая индексы) на P .

Из выражения (25) сразу получаем соотношения, связывающие параметры плотностей распределений мощностей и амплитуд:

$$\alpha_P = \frac{\alpha_A}{2}; \quad (26)$$

$$\lambda_P = \lambda_A 2^{\frac{\alpha_A}{2}}. \quad (27)$$

Для определения параметров распределений для конкретных условий наблюдения земной поверхности необходимо определить параметры распределений через среднюю мощность отражений \tilde{P} и коэффициент вариации мощности K_P . В отличие от логарифмически-нормального распределения, параметры распределения мощности α_P и λ_P получаем в общем случае из решения системы уравнений

$$\frac{1}{\alpha_P} \lambda_P^{\frac{1}{\alpha_P}} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha_P}\right) = \tilde{P}; \quad (28)$$

$$2\alpha_P \frac{\Gamma\left(\frac{2}{\alpha_P}\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha_P}\right)} = 1 + K_P^2. \quad (29)$$

В некоторых частных случаях решение системы можно получить аналитически, выразив в явном виде параметры α_P и λ_P через мощность отражений \tilde{P} и коэффициент вариации мощности K_P . Параметры распределения (21) определяются путем обращения выражений (26) и (27). Численные значения удельных эффективных площадей рассеяния для различных поверхностей земли, а также значения соответствующих коэффициентов вариации можно найти в работах [5–8].

**Отражения от кромки земля-море.
Составное векторное распределение**

В том случае, когда в элемент разрешения бортовой (спутниковой) РЛС попадают участки и земной поверхности, и моря, распределение амплитуды суммарного сигнала будет отличаться от рассмотренных выше распределений. Здесь наблюдаемый сигнал будет представлять собой векторную сумму сигналов, отраженных от фрагментов земной поверхности и моря, попавших в элемент разрешения РЛС.

Пусть площадь элемента разрешения РЛС равна S , и в этот элемент попадают фрагменты участков морской S_M и земной S_3 поверхностей, т. е.

$$S = S_M + S_3 = \gamma S + (1 - \gamma) S, \quad (30)$$

где $S_m = \gamma S$ и $S_3 = (1 - \gamma)$ — площади соответствующих участков. Тогда средние мощности сигналов, отраженных от этих фрагментов, пропорциональны коэффициентам γ и $(1 - \gamma)$. Поэтому параметры закона (14) вычисляются по выражениям (17) и (18) при замене в выражении (18) \tilde{P} на $\gamma\tilde{P}$, а параметры закона (25) — по выражениям (28) и (29) при замене в выражении (28) \tilde{P} на $(1 - \gamma)\tilde{P}$. Соответственно, аналогично корректируются параметры законов (10) и (21), определяющих флюктуации амплитуд отраженных сигналов [9].

Алгоритм моделирования отражений от кромки может быть представлен в разных видах. Запишем алгоритм пошагово, считая, что в нашем распоряжении имеется датчик псевдослучайных чисел, равномерно распределенных на интервале $(0, 1)$, k -равномерность которого не менее пяти. При этом считаем, что все радиолокационные характеристики, определяющие мощность отраженных сигналов от фрагментов элемента разрешения, с учетом условий наблюдения, параметров локатора, состояния морской поверхности и типа земной поверхности вычислены [10].

Алгоритм моделирования

Шаг 1. Определяется (или задается) деление элемента разрешения на области отражений от моря и земной поверхности, которое определяет коэффициент γ .

Шаг 2. Вычисляются по выражениям (17)–(20), с учетом замены \tilde{P} на $\gamma\tilde{P}$, параметры закона распределения (10) $\sigma_A^{(m)}$ и $\bar{A}^{(m)}$, где верхний индекс в скобках определяет отражения от морской поверхности.

Шаг 3. Вычисляются по выражениям (26)–(28), с учетом замены \tilde{P} на $(1 - \gamma)\tilde{P}$, параметры закона распределения (21) $\alpha_A^{(3)}$ и $\lambda_A^{(3)}$, где верхний индекс в скобках определяет отражения от земной поверхности.

Шаг 4. Вычисляются $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ — псевдослучайные, совместно независимые числа, равномерно распределенные на интервале $(0, 1)$.

Шаг 5. Вычисляется амплитуда $A_{(m)}$ сигнала, обусловленного отражениями от фрагмента морской поверхности:

$$A_{(m)} = \bar{A}^{(m)} \exp(\sigma_A^{(m)} \sqrt{2 \ln \varepsilon_1} \cos(2\pi \varepsilon_2)),$$

где нижний индекс в скобках определяет отражения от морской поверхности.

Шаг 6. Вычисляется амплитуда $A_{(3)}$ сигнала, обусловленного отражениями от фрагмента земной поверхности

$$A_{(3)} = \alpha_A^{(3)} \sqrt{-\frac{1}{\lambda_A^{(3)}} \ln \varepsilon_3},$$

где нижний индекс в скобках определяет отражения от земной поверхности.

Шаг 7. Вычисляется амплитуда A сигнала, обусловленного отражениями от кромки земля-море:

$$A = \sqrt{A_{(3)}^2 + A_{(m)}^2 + 2A_{(3)}A_{(m)} \cos(2\pi \varepsilon_4)},$$

при этом полагаем, что разность фаз векторов сигналов, отраженных от фрагментов земной и морской поверхности, равномерно распределена на интервале $(0, 2\pi)$.

Представленный алгоритм моделирования при $\gamma = 1$ формирует сигнал, отраженный только от морской поверхности, а при $\gamma = 0$ — только от земной, так как соответствующие амплитуды при вычислении параметров, с учетом значения коэффициента γ , обнуляются. Следует отметить, что представленный подход позволяет в алгоритме при соответствующей модификации использовать и другие аппроксимации законов распределения флюктуаций.

Выводы

Получен алгоритм, позволяющий моделировать локационные сигналы, отраженные от морской поверхности, от поверхности земли и от кромки земля-море. В качестве законов распределения амплитуд и мощностей сигналов, отраженных от подстилающих поверхностей, использованы логарифмически-нормальный закон для отражений от морской поверхности и закон распределения Вейбулла для отражений от земной поверхности. Методика синтеза алгоритма позволяет использовать и другие законы распределения. С практической точки зрения подобные алгоритмы могут использоваться при моделировании процессов картографирования береговой зоны, обнаружения наземных и морских объектов, а также при моделировании процессов посадки гидросамолетов вблизи портов.

Литература

1. Изранцев В. В., Шепета Д. А. Моделирование внешних сигналов бортовых приборных комплексов летательных аппаратов пятого поколения // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. № 2. С. 76–83.

2. Шалыгин А. С., Палагин Ю. И. Прикладные методы статистического моделирования. — Л.: Машиностроение; Ленинградское отделение, 1986. — 320 с.
3. Блаунштейн Н. Ш., Сергеев М. Б., Шепета А. П. Прикладные аспекты электродинамики. — СПб.: Аграф+, 2016. — 272 с.

4. Исаков В. И., Подоплекин Ю. Ф., Шепета Д. А. Марковская модель флуктуаций амплитуд и длительностей эхо-сигналов крупных надводных объектов // *Морской вестник*. 2016. № 3 (59). С. 49–50.
5. Подоплекин Ю. Ф., Ненашев В. А., Шепета Д. А. Моделирование входных сигналов бортовой РЛС, обусловленных отражениями зондирующего сигнала от подстилающих поверхностей земли и моря // *Морской вестник*. 2016. № 4. С. 69–71.
6. Тверской Г. Н., Терентьев Г. К., Харченко И. П. Имитаторы эхо-сигналов судовых радиолокационных станций. — Л.: Судостроение, 1973. — 228 с.
7. Кулемин Г. П. Радиолокационные помехи от моря и суши РЛС сантиметрового и миллиметрового диапазонов // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. (докл.). Киев: АН Украины, НПО Квант. 1994. Вып. 1. С. 23–29.
8. Верба В. С. Справочник по радиолокации / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы. В 2 кн. Кн. 2. — М.: Техносфера, 2015. — 680 с.
9. Shepeta A. P., Nenashev V. A. Modeling Algorithm for SAR Image Based on Fluctuations of Echo Signal of the Earth's Surface // *Proc. of SPIE Remote Sensing, Toulouse, France, 2015. Vol. 9642. P. 96420X-1–96420X-8.*
10. Кузьмин А. В., Поспелов М. Н., Садовский И. Н. Микроволновые радиометрические исследования морской поверхности в прибрежной зоне Черного моря // Сб. ст. М.: ГРАНП-Полиграф, 2005. С. 103–110.

UDC 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.89

Simulation of Radar Signals Reflected from the Edge of Land and Sea

Isakov V. I.^a, PhD, Tech., Associate Professor, ivi@guap.ru

Shepeta D. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, dima@shepeta.com

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Mathematical models of echo signals from underlying surfaces of the land and sea are used in synthesis and analysis of aircraft onboard radars which carry out the search, detection and tracking of objects. In these cases, the echoes are noise on whose background the information signals are selected and processed. When approximating the density of the reflected signal amplitude probability distribution, many researchers use the Rayleigh distribution density. To approximate the amplitude distribution of signals reflected by an underlying surface, the studies of high-precision radars characteristics often use log-normal distribution density, Weibull distribution density, compound distributions and some other distribution densities. **Purpose:** We develop a universal algorithm to simulate the fluctuations of radar signals reflected from the edge of land and sea. **Results:** We have obtained a simulation algorithm which allows you to simulate the fluctuations of a signal reflected from the edge of land and sea. As the distribution laws for amplitude and power of the signals reflected from underlying surfaces, we used the log-normal law for the reflections from the sea, and the Weibull distribution law for the reflections from the land. The algorithm synthesis technique allows you to use other distribution laws, too. The simulation algorithms for the signals reflected from the land or sea are special cases of the presented algorithm. **Practical relevance:** This algorithm can be used in the development of coastline mapping equipment, as well as in testing flarecraft takeoff and landing modes near ports.

Keywords — Model, Radar Signal, Edge of Land and Sea.

References

1. Izrantsev V. V., Shepeta D. A. Simulation of External Signals on-Board Instrument Systems for Aircraft of the Fifth Generation. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2000, no. 2, pp. 76–83 (In Russian).
2. Shalygin A. S., Palagin Y. I. *Prikladnye metody statisticheskogo modelirovaniia* [Applied Methods of Statistical Modeling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 320 p. (In Russian).
3. Blaunstein N. S., Sergeev M. B., Shepeta A. P. *Prikladnye aspekty elektrodinamiki* [Applied Aspects of Electrodynamics]. Saint-Petersburg, Agraf+ Publ., 2016. 272 p. (In Russian).
4. Isakov V. I., Podoplekin Y. F., Shepeta D. A. Markov Model of the Fluctuations of the Amplitudes and Durations of the Echo-signals of Large Surface Objects. *Morskoi vestnik* [Bulletin of Marine], 2016, no. 3 (59), pp. 49–50 (In Russian).
5. Podoplekin Y. F., Nenashev V. A., Shepeta D. A. Modeling of Input Signals to Onboard Radar, due to the Accumulated Reflections of the Probing Signal from the Underlying Surfaces of the Earth and Sea. *Morskoi vestnik* [Bulletin of Marine], 2016, no. 4, pp. 69–71 (In Russian).
6. Tverskoy G. N., Terentyev G. K., Kharchenko I. P. *Imitatory ekho-signalov sudovykh radiolokatsionnykh stantsii* [Imitators Echoes of Ship Radar Stations]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1973. 228 p. (In Russian).
7. Kulemin G. P. Radar Clutter from Land and Sea Radar in the Centimeter and Millimeter. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii (doklady)* [Proc. of Intern. Scientific-Technical Conf. (reports)]. Kiev, AN Ukrainy, NPO Kvant Publ., 1994, vol. 1, pp. 23–29 (In Russian).
8. Verba V. S. *Spravochnik po radiolokatsii* [Handbook of Radar]. M. I. Skolnick ed. In 2 books. Book 2. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2015. 680 p. (In Russian).
9. Shepeta A. P., Nenashev V. A. Modeling Algorithm for SAR Image Based on Fluctuations of Echo Signal of the Earth's Surface. *Proc. of SPIE Remote Sensing*, Toulouse, France, 2015, vol. 9642, pp. 96420X-1–96420X-8.
10. Kuzmin A. V., Pospelov M. N., Sadovsky I. N. Microwave Radiometric Investigations of the Sea Surface in the Coastal Zone of the Black Sea. *Sbornik statei* [Collection of Articles]. Moscow, GRANP-Poligraf Publ., 2005, pp. 103–110 (In Russian).