

Моделирование сигнала, отраженного от морской поверхности, — использование моделей случайных полей

© Н.В. Верденская, И.А. Иванова

АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца»

Универсальная модель отражения радиолокационного сигнала от морской поверхности является мощным инструментом при разработке радиолокаторов, предназначенных для решения задачи дистанционного зондирования Земли. Такая модель позволяет не только выбрать наилучшие технические решения при создании радиолокаторов, но и протестировать используемые методы и алгоритмы обработки информации для формирования процессов оптимальной обработки получаемой информации. Кроме того, модель позволяет оценить теоретически возможную точность оценок и границы применимости тех или иных технических решений, а также решить актуальные задачи распознавания различных объектов на морской поверхности.

Ключевые слова: математическая модель сигнала, отраженный сигнал, траекторный сигнал, модель поверхности, шероховатая поверхность, функция отражения, диффузное отражение, зеркальное отражение, модель радиолокатора, траектория движения, состояние среды.

Введение. Решение различных задач, касающихся дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), чаще всего связано с анализом сигнала, отраженного от объекта на фоне динамически изменяющейся шероховатой поверхности, например морской. Поскольку поверхность имеет случайную структуру и быстро изменяется во времени, для описания ее свойств требуется большое количество измерений, получение которых дорого и технически сложно. В качестве альтернативы или дополнения к реальным измерениям можно использовать стохастические математические модели, имитирующие процесс отражения электромагнитной волны (сигнала) от шероховатой поверхности. Такая модель позволяет сформировать отражение от стохастической быстро изменяющейся поверхности и наложить на него отражение от интересующего исследователя объекта, например, при решении задачи распознавания. Модель является в некотором смысле универсальной, поскольку позволяет моделировать физические процессы, происходящие при излучении, распространении, отражении и приеме сигнала.

Обычно исследователя интересует модель отраженного сигнала на входе приемника — модель траекторного сигнала.

Общая модель траекторного сигнала включает в себя:

- 1) модель поверхности;
- 2) модель отражения;
- 3) модель радиолокатора;
- 4) модель движения носителя, а также режим обработки;
- 5) блок, описывающий состояние среды (погодные условия, состояние ионосферы и т. д.).

Покажем, как формируется траекторный сигнал и каким образом в него входят перечисленные «подмодели» [1].

Модель траекторного сигнала. Поле возбуждения $E(\xi, \eta)$ в апертуре передающей антенны формирует диаграмму направленности (ДН) $F(\theta, \kappa)$, которая, в свою очередь, образует поле облучения $E_0(\overline{x_{\text{ц}}})$ в районе цели, где $\overline{x_{\text{ц}}}$ — радиус вектор цели. Цель есть точка или объект на поверхности, т. е. интересующий нас объект. Будем считать, что излучается монохроматический сигнал, длина волны которого $\lambda = \frac{2\pi}{|\overline{k}|}$,

где $|\overline{k}|$ — волновой вектор (соответственно, частота $\omega = \frac{c}{\lambda}c$). Поле облучения и функция отражения цели $\vartheta(\overline{x_{\text{ц}}})$ формируют поле рассеяния цели $E_{\text{ц}}(\overline{x_{\text{ц}}}) = E_0(\overline{x_{\text{ц}}})\vartheta(\overline{x_{\text{ц}}})$. Пройдя среду распространения от объекта до радиолокатора, поле цели возбуждает в апертуре приемной антенны поле $E_T(\xi, \eta)$. Последовательно перемещаясь в пространстве по заданной траектории с помощью носителя радиолокатора, антенна формирует за время синтеза T_c траекторный сигнал — синтезированную апертуру (СА). Поскольку размер СА $\overline{X_c}$ гораздо больше размера d реальной апертуры, в большинстве случаев цель находится в промежуточной (а не дальней) зоне СА. Поэтому поле $E_T(\xi, \eta)$ на траектории определяется как преобразование Френеля (а не Фурье) от поля рассеяния цели $E_{\text{ц}}(\overline{x_{\text{ц}}})$:

$$E_T(\xi, \eta, \overline{x}) = \frac{j\overline{k}}{2\pi} \int_{\overline{X_c}} E_{\text{ц}}(\overline{x_{\text{ц}}}) \frac{\exp\{j\overline{k}r\}}{r} d\overline{x}, \quad (1)$$

где $\overline{k}$ — волновой вектор; r — расстояние от точки цели $\overline{x_{\text{ц}}}$ до точки на СА с координатами (ξ, η) реальной апертуры и траекторного сигнала.

Физически такая запись означает, что каждая точка цели формирует сферическую волну $\frac{\exp\{jk\bar{r}\}}{r}$ и общее поле на СА есть сумма сферических (а не плоских, как в дальней зоне) волн от каждой точки цели.

Носитель радиолокатора движется с постоянной скоростью V вдоль оси X . Линейная антенна расположена вдоль оси X . В пространстве целей на расстоянии R_H формируется полоса обзора (X_{Π}, Y_{Π}) . Такой случай соответствует боковому обзору радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА). Представим расстояние $r = \sqrt{x_{\Pi}^2 + (R_H + y_{\Pi})^2}$ в виде степенного ряда и отбросим малые члены, учитывая, что $R_H \gg X_c$, а y_{Π}, x_{Π} такие, что $r = R_H + y_{\Pi} + \frac{x_{\Pi}^2}{2R_H}$.

Тогда поле цели на траектории можно записать как преобразование Френеля поля $E_{\Pi}(\bar{x}_{\Pi})$:

$$E_T(\xi, \eta, \bar{x}) = \frac{jk}{2\pi} \exp(-jkR_H) \times \\ \times \int_{X_{\Pi}} \int_{Y_{\Pi}} E_{\Pi}(x_{\Pi}, y_{\Pi}) \exp\{-jky_{\Pi}\} \exp\left\{-jk \frac{x_{\Pi} - VT - \xi}{2R_H}\right\} dx_{\Pi} dy_{\Pi}.$$

Будем формировать суммарную диаграмму направленности на прием F , т. е. $E_T(t) = \int_d E_T(\xi, t) d\xi$, где d — размер реальной антенны.

В результате напряженность поля на выходе антенны (траекторный сигнал $E_T(t)$) как функция времени (координаты $x = Vt$ траекторного сигнала) имеет вид

$$E_T(t) = \frac{jk}{2\pi} \exp(-jkR_H) \times \\ \times \int_{X_{\Pi}} \int_{Y_{\Pi}} E_{\Pi}(x_{\Pi}, y_{\Pi}) \exp\{-jky_{\Pi}\} \exp\left\{-jk \frac{(x_{\Pi} - VT - \xi)^2}{2R_H}\right\} dx_{\Pi} dy_{\Pi}.$$

При интегрировании по ξ здесь пренебрегли ξ^2 , так как на малой апертуре реальной антенны поле можно считать плоским (дальняя зона

реальной антенны). Полагая, что на прием и передачу используется одна и та же антенна, аналогичным образом запишем поле облучения в плоскости $(X_{\text{ц}}, Y_{\text{ц}})$ и после интегрирования по ξ получим

$$E_T(t) = \frac{jk}{2\pi} \exp(-jkR_H) \times \times \int_{X_{\text{ц}}} \int_{Y_{\text{ц}}} \vartheta(x_{\text{ц}}, y_{\text{ц}}) \exp\{-j2ky_{\text{ц}}\} \exp\left\{-jk \frac{(x_{\text{ц}} - VT)^2}{2R_H}\right\} F^2\left(\frac{x_{\text{ц}} - VT}{2R_H}\right) dx_{\text{ц}} dy_{\text{ц}}. \quad (2)$$

Анализ структуры поля на синтезированной апертуре (траекторного сигнала) показывает, что:

– фазовый множитель $\frac{jk}{2\pi} \exp(-jkR_H)$ определяет амплитуду и начальную фазу;

– фазовый множитель $\exp\{-j2ky_{\text{ц}}\}$ определяет изменение постоянной по апертуре начальной фазы при изменении координаты дальности цели;

$$– \text{ фазовый множитель } \exp\left\{-jk \frac{(x_{\text{ц}} - Vt)^2}{2R_H}\right\} = \exp\left\{\frac{-jk}{2R_H}(x_{\text{ц}}^2 - 2x_{\text{ц}}Vt + V^2t^2)\right\}$$

определяет изменение начальной фазы от угловой координаты цели (член $x_{\text{ц}}^2$), квадратичное изменение фазы сигналов, одно и то же для всех целей по апертуре, пропорциональное угловой координате цели (член $2x_{\text{ц}}Vt$);

– амплитудный множитель $F^2\left(\frac{x_{\text{ц}} - VT}{2R_H}\right)$ формируется ДН приемной и передающей антенн $F(\theta)$ и определяет весовую функцию обработки траекторного сигнала $F^2(t)$, интервал синтезирования T_c и зону обзора по углу $F^2(x_{\text{ц}})$.

Рассчитывая падающее на антенну поле, предполагали, что поле возбуждения $E(\xi, \eta)$ представляет собой монохроматическую волну. Для того чтобы перейти от поля $E_T(t)$ к сигналу $S_T(t)$, нам необходимо учесть отражения (2) для всех частот, отвечающих излученному сигналу $S_0(t)$. Для этого необходимо рассчитать спектр $E_T(\omega)$, умно-

жить его на спектр сигнала $S_0(\omega)$ и посчитать обратное преобразование Фурье:

$$S_T(t) = FFT^{-1}(E_T(\omega)S_0(\omega)). \quad (3)$$

Получая формулу (2), учитывали свойства распределения энергии по апертуре антенны (ДН). Заметим еще раз, что при формировании траекторного сигнала мы учитывали отраженный сигнал во всей полосе обзора.

Более простой моделью является модель отражения от точки поверхности. В этом случае задача рассматривается в дальней зоне радиолокатора [2]. При этом распределением поля по антенне (диаграммой направленности) пренебрегают, считая, что излучается плоская волна, а отражатель является точечным. Предположим, что излучается частотно-модулированный сигнал специального вида $S_0(t) = \exp(j\pi\mu t^2) \times \exp(j2\pi ft)$, где (μ, f) — параметры сигнала. В этом случае траекторный сигнал моделируется следующим образом:

$$S(r, \varphi, \theta, t) = \mathfrak{G}(r, \varphi, \theta) \operatorname{sinc} \left\{ \frac{2B}{c} [r - R(t)] \right\} \times \exp \left\{ \frac{-j4\pi}{\lambda} [R_0 - Vt \sin \varphi \cos \theta - d \sin \varphi \cos \theta + R_{rand}(t)] \right\}, \quad (4)$$

где r — дальность; $\mathfrak{G}(r, \varphi, \theta)$ — функция отражения (удельная ЭПР) в точке (r, φ, θ) ; $R(t)$ — наклонная дальность в момент времени t , которая задается сложной зависимостью от углов и скоростей как радиолокатора, так и отражателя; c — скорость света; λ — длина волны (как и выше, предполагается монохроматическая волна); (θ, φ) — угол места и азимут; d — величина, зависящая от взаимного положения приемника и передатчика; V — скорость радиолокатора относительно некоторой инерционной системы координат; R_0 — начальная наклонная дальность; B — ширина спектра; $R_{rand}(t)$ — случайные флуктуации наклонной дальности, зависящие в основном от флуктуаций скорости движения отражателя. Величина $R_{rand}(t)$ сложным образом зависит от движений точки отражения [2] и описывает случайные колебания этой точки.

Спектр сигнала (4) задается формулой

$$\begin{aligned}
 S(r, f_a) = F_t[S(r, t)] = \sigma_r \sin \left(c \left\{ \frac{2B}{c} [r - R(f_a)] \right\} \right) \times \\
 \times \exp \left\{ \frac{-j4\pi}{\lambda} \left[R_0 - \frac{d \sin \varphi \cos \theta}{2} \right] \right\} \times \\
 \times \sin \left(c \left[T_a \left(f_a - \frac{2}{\lambda} V \sin \varphi \cos \theta \right) \right] \right) \otimes FFT_t \left\{ \exp \left[\frac{-j4\pi}{\lambda} R_{rand}^{sea}(t) \right] \right\}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Здесь σ_r — амплитуда спектра на частоте f_a ; T_a — время наблюдения; символ $\otimes$ означает свертку.

Как видно из формулы (4), сигнал зависит от функции поверхности (рельеф + шероховатость), функции отражения, скоростей движения лоатора и точки (области) отражения и направления луча (азимута и угла места). Поэтому для получения модели сигнала как для модели (2), (3), так и для модели (4), (5) необходимо сформировать модель поверхности и модель функции отражения. Далее рассмотрим модели рельефа, поверхности, что особенно важно для морской поверхности, и функции отражения.

Общая модель поверхности. В общем случае модель поверхности включает:

- крупномасштабную модель поверхности или модель рельефа,
- мелкомасштабную модель поверхности (модель шероховатой поверхности).

Модель рельефа формируется на основе набора геодезических измерений высот. Набор таких измерений обычно аппроксимируется локально-гладкой поверхностью с помощью того или иного алгоритма.

В случае использования алгоритма триангуляции в качестве такой поверхности выступает плоскость. Другие методы аппроксимации могут использовать поверхности второго порядка или специальные функции, такие как гауссовская функция с различными параметрами.

При моделировании отражения важно достаточно точно аппроксимировать не только саму поверхность, но и ее производные по направлениям, поскольку они играют существенную роль в определении направления отражения и зоны обзора.

Особенностью модели морской поверхности является то обстоятельство, что в качестве рельефа рассматривается плоскость.

Мелкомасштабная *модель поверхности* характеризует мелкомасштабные изменения высот и бывает двух типов: детерминированная и случайная.

Детерминированные мелкомасштабные изменения обычно стационарны во времени (по крайней мере, за время зондирования) и относятся в большинстве случаев к объектам человеческой деятельности: городской застройке, предприятиям и прочим зданиям, дорогам и другим участкам человеческой деятельности.

Случайные изменения обычно характеризуют естественную среду, отражающие свойства которой изменяются со временем в процессе зондирования и зависят от погоды (силы ветра, времени года и т. д.). К таким поверхностям относят лес, пашню, поле и другие участки земной и водной поверхности, характеризующиеся случайной текстурой. Моделируются такие поверхности как случайные поля различной структуры. В зависимости от соотношения длины волны зондирующего сигнала и размеров отражающих элементов на поверхности (размер листьев, самих растений и т. д.) рассматриваются либо дельта-коррелированные случайные поля, либо поля с корреляционной функцией заданного вида. Для моделирования различных растительных покровов чаще используются дельта-коррелированные по пространству модели. Состояние морской поверхности характеризуется видом корреляционной функции по пространству и времени.

В случае земной поверхности модель рельефа и мелкомасштабная модель обычно накладываются друг на друга.

Модель отражения. Отражение от точки на поверхности может быть зеркальным и диффузным. При зеркальном отражении падающая волна частично отражается, частично преломляется, при этом коэффициент преломления зависит от соотношения показателей преломления сред. Именно он определяет энергию отраженной волны по отношению к падающей.

Если отражение диффузное, то отражение происходит во все стороны. Реальные поверхности естественного и искусственного происхождения создают одновременно и зеркальное и диффузное отражение.

Если элемент разрешения велик по отношению к длине волны облучения и содержит множество «элементарных отражателей», то диффузное отражение моделируется гауссовским распределением с нулевым средним, а дисперсия определяется удельной ЭПР элемента разрешения и его размером. При этом амплитуда элемента фона распределена по закону Рэлея.

Если элемент разрешения содержит небольшое количество элементарных отражателей (такое возможно, например, для морской поверх-

ности), то распределение функции отражения уже не будет гауссовским. Для таких поверхностей в качестве моделей функции отражения используются в основном модели с тяжелыми хвостами: K -распределение, модели смеси распределений и т. д.

Модель радиолокатора, модель движения. Понятно, что доля отражения от поверхности, попадающая на приемную антенну, определяется как свойствами поверхности, так и взаимным расположением радиолокатора и зондируемой точки поверхности. Кроме того, технические особенности радиолокатора, такие как вид излучаемого сигнала, уровень шумов, расположение антенны относительно траектории движения и т. д., наряду с другими факторами определяют вид принимаемого отраженного сигнала, а в случае построения радиолокационного изображения существенными оказываются траектория движения (точность ее измерения, тип) и тип обзора. Все это должно быть учтено при построении модели.

Состояние среды. Построение модели, поведение которой согласовано с изменениями состояния среды, является, пожалуй, самой сложной задачей моделирования.

Физический процесс отражения электромагнитной волны от поверхности зависит от множества разнородных факторов, и эта зависимость должна быть учтена при формировании модели траекторного сигнала.

Так, при формировании модели поверхности необходимо учитывать зависимость модели:

- от скорости ветра, влияющей на изменчивость текстуры поверхности;
- влажности, влияющей на отражающие свойства поверхности;
- времени года, влияющего на состояние растительного покрова, водной поверхности и т. д.;
- температуры поверхности, которая также влияет на отражающие свойства различных поверхностей, и т. д.

Должны быть учтены такие факторы, как соленость воды и ветер, влияющие как на отражающие свойства водной поверхности, так и на структуру этой поверхности, и т. д. Существенны также факторы, влияющие на устойчивость траектории движения, например ветер и дождь. Если носителем радиолокатора является спутник, то существенным фактором оказывается состояние различных слоев атмосферы. Для адекватного поведения модели все (или большинство) этих факторов должны быть формализованы и учтены в виде параметров. При этом число параметров должно быть ограничено, иначе модель становится слишком сложной и неудобной для использования. Кроме того, и это тоже слож-

ная задача, границы применимости модели должны быть определены в параметрическом пространстве.

Особенности моделирования морской поверхности. Морская поверхность характеризуется своей изменчивостью в зависимости от состояния окружающей среды и стохастической структурой, что определяет особенности ее моделирования.

Морская поверхность, как и любая водная поверхность, не имеет крупномасштабного рельефа и при моделировании локальных участков морской поверхности можно пренебречь кривизной Земли и считать ее плоской.

Мелкомасштабная составляющая морской поверхности представляет собой сложную текстуру и является очень изменчивой.

Состояние морской поверхности, а также ее отражающие свойства, сильно зависят от состояния окружающей среды. Например, волнение на море принято подразделять на три типа: ветровое, гравитационное и капиллярное. Первый и третий тип волнения полностью определяются окружающей средой.

Чтобы отразить стохастическую структуру и изменчивость морской поверхности, для ее моделирования используют различные модели случайных полей. Чаще всего рассматривают линейные стохастические модели вида авторегрессия — скользящее среднее (АРСС), позволяющие представить морскую поверхность в виде суммы конечного числа колебаний со случайными параметрами. Рассматриваются два типа таких моделей — спектральные и корреляционные.

Спектральные модели позволяют описать структуру поверхности путем построения частотного и углового спектров, соответствующих экспериментальным данным (рис. 1). Обычно предполагается, что спектр может быть факторизован, т. е. представлен в виде произведения частотного и углового спектров. В качестве частотного спектра чаще всего используют спектр Пирсона — Московича, а в качестве углового — спектр Дарбишайра.

При корреляционном подходе применяют не спектральное, а временное представление модели, а в качестве исходных данных для оценки параметров — выборочную корреляционную функцию. Оценки параметров находят с помощью решения системы уравнений Юла — Уокера.

Второй подход представляется более громоздким, однако его проще реализовать на экспериментальных данных.

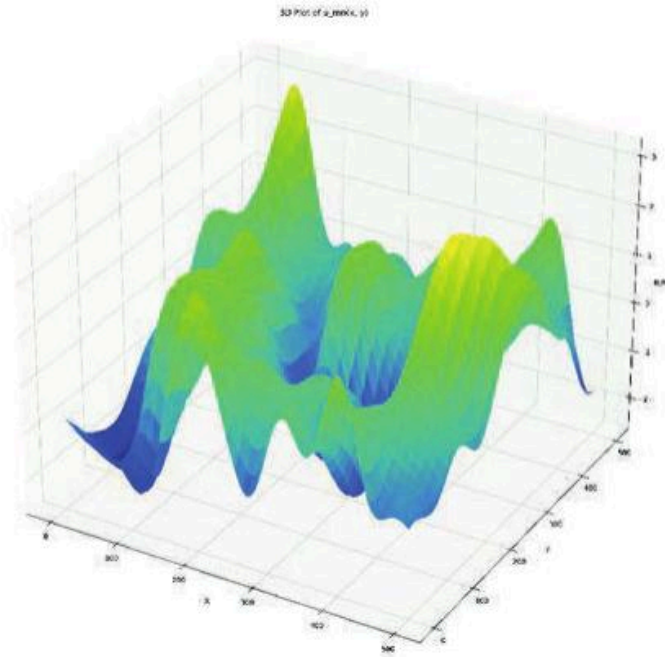


Рис. 1. Спектральная модель морской поверхности

Как и в общем случае, модель сигнала, отраженного от морской поверхности, включает соответствующие «подмодели»:

- 1) модель поверхности;
- 2) модель отражения;
- 3) модель радиолокатора;
- 4) модель движения носителя, а также режим обработки;
- 5) блок, описывающий состояние среды (погодные условия, состояние ионосферы и т. д.).

Рассмотрим их особенности при моделировании морской поверхности.

Модель отражения. Прежде всего стоит отметить, что стохастическая структура морской поверхности формирует стохастическую структуру зеркального отражения. Это необходимо учитывать при моделировании. Каждый элемент разрешения (или часть его) могут оказаться повернутыми по отношению к локатору таким образом, что приниматься будет не только диффузная, но и зеркальная составляющая отражения.

Кроме того, случайная структура самой поверхности приводит к тому, что распределение функции отражения (удельной ЭПР) нельзя считать гауссовским. Для моделирования такой функции отражения в литературе было предложено большое количество моделей, начиная с различных распределений семейства Гамма и кончая моделями смеси распределений.

Наиболее обоснованным кажется использование для описания удельной ЭПР морской поверхности семейства K -распределений, подробно изученного в работе [3].

Следует отметить, что одной из важных и трудно решаемых задач является параметризация модели отраженного сигнала. На практике желательно (и обязательно) иметь возможность управлять поведением модели, варьируя определенный набор параметров. При этом параметры должны определяться понятными и легко измеримыми величинами, такими как температура воздуха, температура воды, скорость ветра, влажность, соленость и т. д.

Второе замечание касается получения экспериментальных данных. Следует отметить, что при моделировании морской поверхности могут быть использованы как оптические, так и радиолокационные изображения, поскольку значение интенсивности в точке для таких изображений с учетом ракурса связана с высотой точки относительно опорной плоскости.

Моделирование радиолокационных изображений. Моделирование радиолокационных и оптических изображений морской поверхности является гораздо более простой задачей, чем моделирование отраженного сигнала, по следующей причине: при получении изображения теряется информация об используемом сигнале, движении носителя и т. д., но сохраняется информация о длине волны и ракурсе. При построении изображения чаще всего получаем его в дискретном виде.

Сказанное позволяет не создавать сложную модель траекторного сигнала на входе приемника с дальнейшей его обработкой, а использовать модель случайных полей напрямую, сразу формируя модель изображения.

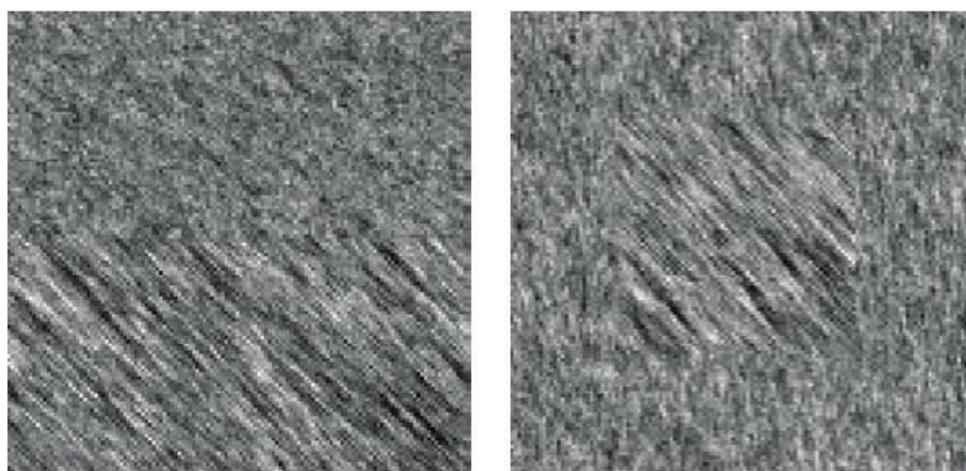


Рис. 2. Двумерная модель авторегрессии и скользящего среднего изображений морской поверхности

Для этого можно использовать те же модели случайных полей, что предлагаются для построения модели поверхности, напрямую. Кроме АРСС моделей случайных полей, для построения моделей изображений морской поверхности предлагается аппарат марковских-гиббсовских случайных полей. В частности, такие модели были рассмотрены в работе [4].

Заключение. Моделирование сигнала, отраженного от морской поверхности, является сложной и громоздкой задачей, однако актуальной при решении различных задач ДЗЗ, в частности, распознавания объектов на поверхности моря. Оно позволяет корректно описать принимаемый сигнал, отраженный от земной поверхности, симитировать экспериментальные данные и уменьшить потребность в длительных и дорогостоящих натурных экспериментах. Моделирование сигнала, отраженного от морской поверхности, позволяет описать распространение сигнала в зависимости от конечного набора параметров, характеризующих состояние окружающей среды и движения носителя, и используемых методов обработки сигнала в радиолокаторе, симулируя процесс получения реальных данных. Предлагаемая модель состоит из блоков, реализующих модель поверхности, функцию отражения, структуру отражения, траекторию движения и работу радиолокатора, а также состояние среды, поэтому модель, вообще говоря, является универсальной и может быть расширена для описания конкретной ситуации и конкретных условий.

В случае когда имитации физического процесса излучения, распространения и приема сигнала не требуется, можно моделировать не принимаемый сигнал, а непосредственно изображение поверхности земли, в частности, морской. В этом случае, как и при моделировании поверхности, используются соответствующим образом параметризованные модели случайных полей. В этом случае модель получается менее громоздкой, но перестает быть универсальной.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. *Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли*. Москва, Радиотехника, 2005, 368 с.
- [2] Huang P., Zou Z., Xia X.-G., Liu X., Liao G., Xin Z. Multichannel Sea Clutter Modeling for Spaceborne Early Warning Radar and Clutter Suppression Performance Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2021, vol. 59, iss. 10, pp. 8349–8366.
- [3] Watts S. *The Modeling of Radar Sea Clutter. A Thesis Submitted to the University of Birginingham for the Degree of Doctor of Science*. Birmingham: University of Birmingham, 2013.

- [4] Подоплёкин Ю.Ф., Шепета Д.А., Ненашев В.А. Моделирование входных сигналов бортовой РЛС, обусловленных отражениями зондирующего сигнала от подстилающих поверхностей земли и моря. *Морской вестник*. 2016, № 4 (60), с. 69–72.

Верденская Наталья Владимировна — канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца». e-mail: n_verden@mail.ru.

Иванова Ирина Александровна — начальник лаборатории АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца». e-mail: iva35@mail.ru

Modeling of a signal reflected from the sea surface

© N.V. Verdenskaya, I.A. Ivanova

Long-Range Radar, JSC

The universal model of radar signal reflection from the sea surface is a powerful tool in the development of radars designed to solve the problem of remote sensing of the Earth. Such a model allows not only to select the optimal technical solutions when creating radars, but also to test the methods and algorithms used for processing information to form the optimal processing of the received information. In addition, the model allows to estimate the theoretically possible accuracy of estimates and the limits of applicability of certain technical solutions, as well as to solve current problems of recognizing various objects on the sea surface.

Keywords: *mathematical model of signal, reflected signal, trajectory signal, surface model, rough surface, reflection function, diffuse reflection, specular reflection, radar model, motion trajectory, state of the environment.*

Verdenskaya N.V., Ph.D. (Phys. and Math.), Head of laboratory at Long-Range Radar, JSC. e-mail: n_verden@mail.ru

Ivanova I.A., Head of laboratory at Long-Range Radar, JSC. e-mail: iva35@mail.ru