

УДК 621.391

М.В. БОРЦОВА, А.В. ПОПОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина***МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОМАСШТАБНЫХ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ УГЛАМИ ОРИЕНТАЦИИ СЛОЕВ**

Для решения задачи моделирования радиолокационных поляриметрических сигналов, отраженных подстилающей поверхностью, предложена модель шероховатой поверхности как случайного поля с заданными законом распределения высот и пространственной корреляционной функцией. Рассмотрены недостатки существующих методов моделирования поверхностей со сложной корреляционной структурой и предложена уточненная методика моделирования многомасштабных поверхностей с произвольной ориентацией слоев. Приведены результаты расчета ракурсной зависимости удельной эффективной площади рассеяния морской поверхности, у которой гравитационные волны и ветровая рябь ориентированы под различными углами.

Ключевые слова: моделирование, двумерный случайный процесс, корреляционная функция, многомасштабная шероховатая поверхность, рекурсивный фильтр.

Введение

В настоящее время в связи с участвовавшими случаями техногенных катастроф, вызванных разливами нефти и нефтепродуктов, (таких, например, как авария в Мексиканском заливе в апреле 2010 г.) возрастает актуальность экологического мониторинга водных акваторий. Одним из эффективных средств дистанционного зондирования водных акваторий являются радиолокационные (РЛ) исследования с аэрокосмических носителей, обеспечивающие всепогодность наблюдения и возможность обзора больших территорий [1, 2]. Недостаточная информативность одноканальных радиолокационных снимков привела к тому, что в последнее время начали широко внедряться бортовые РЛ поляриметры. Так, например, за последние 5 лет осуществлен запуск ряда спутников (RADARSAT-2, TerraSAR-X, COSMO-SkyMed 1 – 3) с поляриметрами высокого разрешения на борту [3].

Известно, что радиолокационный сигнал, отраженный морской поверхностью, зависит не только от параметров измерительной аппаратуры, но и от электрофизических свойств поверхности, ее профиля и ракурса наблюдения [4 - 7]. Как следствие, экспериментальные исследования тонкой поляризационной структуры [8] сопряжены с рядом трудностей, обусловленных необходимостью точного контроля состояния водной поверхности с использованием волнографов [9]. Отсутствие достаточного количества экспериментальных данных, в том числе данных наземного контроля, сложность, а иногда и принципиальная невозможность проведения экспериментальных исследований обуславливают необ-

ходимость математического моделирования отраженных радиолокационных сигналов. При этом возникают две задачи – разработка методики расчета отраженного поляриметрического сигнала и создание алгоритмов моделирования профиля отражающего объекта. В работе [10] был предложен метод моделирования шероховатой поверхности, характеризующейся многомодовым пространственным спектром, как совокупности поверхностей с простой частотной структурой. Данный метод обладает существенным недостатком – он не позволяет учитывать, что многие типы подстилающей поверхности, в частности морская, характеризуются различными пространственными ориентациями слоев [7, 11].

Целью данной работы является разработка уточненного метода моделирования морской поверхности при различных ориентациях слоев с проверкой результатов моделирования по реальным данным дистанционного зондирования.

1. Постановка задачи

В работе [12] была предложена модель шероховатой поверхности в виде двумерного случайного процесса $h(x, y)$ с заданным законом распределения высот и заданной двумерной корреляционной функцией $R(\tau_x, \tau_y)$ вида

$$R(\tau_x, \tau_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x, y)h(x + \tau_x, y + \tau_y) dx dy. \quad (1)$$

При дискретном представлении процесса его соседние отсчеты образуют площадки треугольной формы (фацеты), для которых на основе теории

Гюйгенса [13] может быть рассчитан отраженный сигнал. Теория Гюйгенса справедлива только для элементарных отражателей [14], поэтому размеры facets должны быть много меньше длины волны зондирующих сигналов ($\lambda/32$ и менее), то есть при частоте 10 ГГц не превышать 1 мм. Для устранения краевых эффектов при расчете отраженного сигнала размеры моделируемой поверхности должны быть не меньше размеров площадки, освещаемой лучом антенны радиолокационной станции в пределах одного импульса. При ширине диаграммы направленности 3° , длине импульса 1 мкс и дальности 10 км размеры моделируемой поверхности должны быть не менее 550x300 м (см. рис. 1).

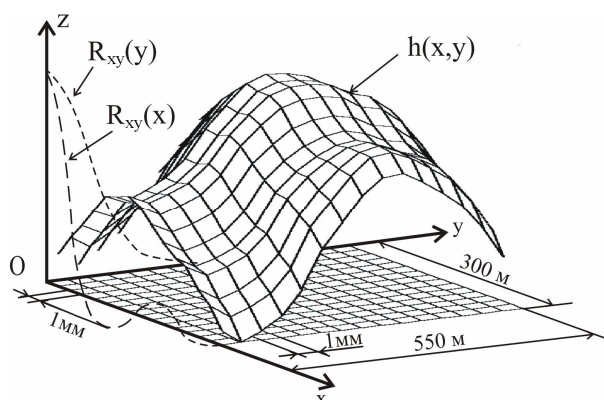


Рис. 1. Общий вид модели поверхности

Традиционные методы моделирования случайных полей с заданной двумерной корреляционной функцией (метод двумерной линейной свертки и спектральный метод [15]) на данном этапе развития вычислительной техники не позволяют формировать поверхность больших размеров, так как требуют больших объемов оперативной памяти ЭВМ и значительных временных затрат на вычисления. Поэтому в работе [12] был предложен метод векторной рекурсивной фильтрации, в основе которого лежит двумерный рекурсивный фильтр вида

$$y_{i,j} = \sum_{k=0}^{K_1} \sum_{l=0}^{K_2} a_{k,l} \cdot x_{i-k,j-l} - \sum_{k=0}^{M_1} \sum_{l=0}^{M_2} b_{k,l} \cdot y_{i-k,j-l} \Big|_{k=l \neq 0}, \quad (2)$$

где $y_{i,j}$ – отсчеты выходного сигнала; K , M – порядок фильтра; $a_{k,l}$, $b_{k,l}$ – постоянные коэффициенты; $x_{i,j}$ – отсчеты входного сигнала.

Методика моделирования шероховатой поверхности при этом заключается в следующем. По заданной двумерной корреляционной функции $R(\tau_x, \tau_y)$ на основе теоремы Винера-Хинчина осуществляется переход к двумерной передаточной

характеристике $W(\omega_x, \omega_y)$. Исходя из соотношения допустимых временных затрат на моделирование и необходимой точности реализации заданной корреляционной функции выбирается порядок рекурсивного фильтра и оптимизационными методами [16] осуществляется подбор коэффициентов $a_{k,l}$, $b_{k,l}$. Затем отсчеты некоррелированного случайного процесса $x_{i,j}$ согласно алгоритма (2) преобразуются в отсчеты случайного процесса $y_{i,j}$ с заданной двумерной корреляционной функцией $R(\tau_x, \tau_y)$.

Данный метод хорошо зарекомендовал себя при моделировании шероховатых поверхностей с простой частотной структурой (например, асфальтового или бетонного покрытия). Однако следует учитывать, что многие Земные покровы (пашни, песок, морская поверхность) характеризуются многомодовым пространственным спектром, который может изменяться с течением времени [5, 6]. Так, например, на спектр морского волнения влияют групповая структура волн, течения, загрязнения, близость береговой черты, глубина моря, а также особенности структуры ветра над морской поверхностью. Изменение спектра волн приводит к изменению характеристик отражения РЛ сигнала даже при одинаковых высотах волн и скорости ветра [7].

Метод векторной рекурсивной фильтрации не позволяет получать адекватные результаты при моделировании поверхностей со сложной частотной структурой, поэтому в работе [10] был предложен метод моделирования многомасштабных шероховатых поверхностей, в котором алгоритмы векторной рекурсивной фильтрации сочетаются с алгоритмами пространственной линейной интерполяции [16]. Данный метод позволяет получать произвольное количество слоев и, следовательно, воспроизводить любой многомодовый спектр. Недостатком метода является то, что при моделировании квазипериодической поверхности, в частности морской, волны всегда ориентированы продольно или поперечно, тогда как при экспериментальных исследованиях ориентация морских волн относительно линии визирования может быть произвольной.

2. Моделирование многомасштабных поверхностей с произвольной ориентацией слоев

Простейшим решением проблемы произвольной ориентации волн квазипериодической шероховатой поверхности может быть поворот системы координат $\{Oxyz\}$ (рис. 1) в пространственной области путем умножения координат на матрицу поворота вида [17]

$$A = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

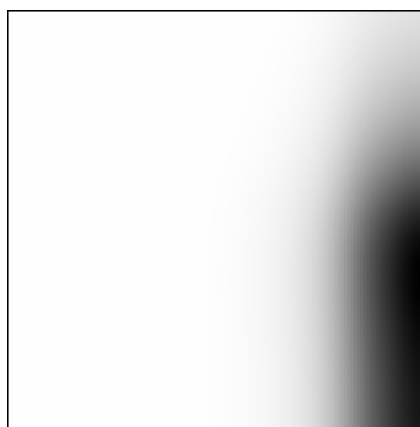
где α - требуемый угол,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = A \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

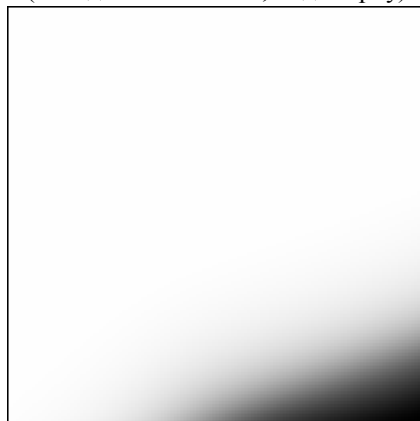
что приводит к повороту поверхности. Однако на практике следует учитывать, что моделируемая поверхность хранится в памяти ЭВМ в виде двумерного массива, порядковые номера элементов которого («виртуальные» координаты x и y) являются целочисленными. Поворот системы координат с последующим округлением координат до целочисленных значений приводит к значительным погрешностям, в результате чего искажается пространственная корреляционная функция поверхности.

С целью решения указанной проблемы предлагается осуществить переход от пространственной области к частотной и вместо поворота поверхности выполнить поворот исходной передаточной характеристики $W(\omega_x, \omega_y)$ (см. рис. 2):

$$W'(\omega_x, \omega_y) = A \times W(\omega_x, \omega_y). \quad (5)$$



(исходное состояние, вид сверху)



(после поворота, вид сверху)

Рис. 2. Поворот передаточной характеристики

При моделировании шероховатой поверхности по алгоритму (2) с помощью рекурсивного фильтра, описываемого передаточной характеристикой $W(\omega_x, \omega_y)$, квазипериодическая поверхность формируется с требуемым углом ориентации волн α .

Методика моделирования многомасштабной шероховатой поверхности с произвольной ориентацией слоев заключается в следующем:

- многомодовый пространственный спектр требуемой шероховатой поверхности разбивается на серию из n узкополосных спектров (рис. 3, а – в);

- для каждого из узкополосных спектров вычисляются шаги дискретизации по частоте Δf_x , Δf_y и по координатам Δx , Δy таким образом, чтобы соблюдалась теорема Котельникова [15];

- оптимизационными методами [16] осуществляется подбор коэффициентов фильтров $a_{k,l}$, $b_{k,l}$ для каждого из слоев;

- рассчитываются уточненные матрицы коэффициентов фильтров с учетом углов ориентации слоев;

- выполняется моделирование n поверхностей с узкополосным пространственным спектром с соответствующими шагами дискретизации по координатам методом векторной рекурсивной фильтрации [10] (рис. 3, д – ж);

- осуществляется пространственная линейная интерполяция [16] полученных поверхностей до требуемого (наименьшего) шага дискретизации;

- полученные в результате интерполяции поверхности центрируются и нормируются;

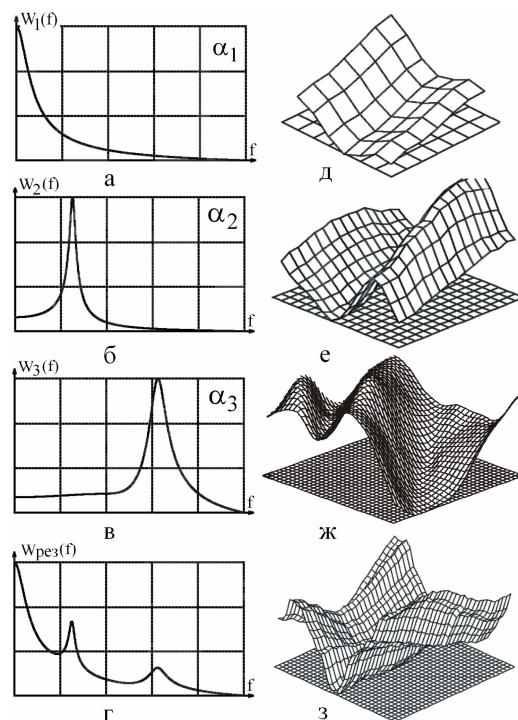


Рис. 3. Методика моделирования многомасштабных поверхностей с произвольной ориентацией слоев

- осуществляется суммирование n поверхностей с требуемыми коэффициентами, соответствующими высотам (рис. 3, з).

В силу линейности преобразования Фурье суммирование поверхностей обеспечивает суммирование спектров (рис. 3г), следовательно, широкополосный спектр результирующей поверхности будет представлять собой суперпозицию исходных узкополосных пространственных спектров, при этом искажение ориентации слоев в процессе суммирования не происходит.

3. Проверка результатов моделирования

Для проверки предлагаемой методики на ЭВМ было разработано программное обеспечение для моделирования многомасштабных шероховатых поверхностей с произвольной ориентацией слоев. Осуществлялось моделирование морской поверхности, в которой гравитационные волны направлены к наблюдателю, а ветровая рябь - под углом 30° относительно линии визирования. Спектр такой поверхности содержит три моды, соответственно поверхность представлена тремя слоями, один из которых (ветровая рябь) повернут на 30° (рис. 4 – 6).

Результирующая поверхность представлена на рис. 7.



Рис. 4. Крупные гравитационные волны (вид сверху)



Рис. 5. Мелкие гравитационные волны (вид сверху)

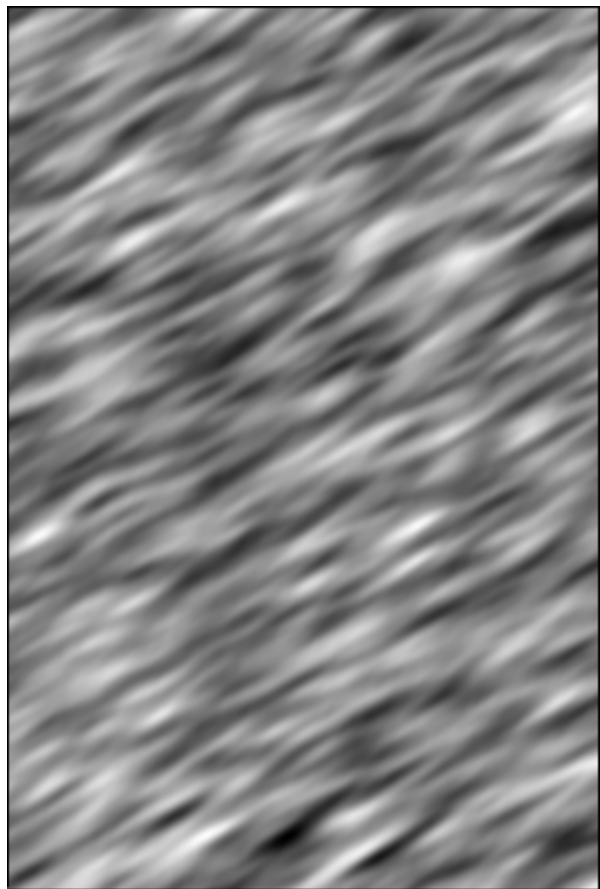


Рис. 6. Ветровая рябь (вид сверху)

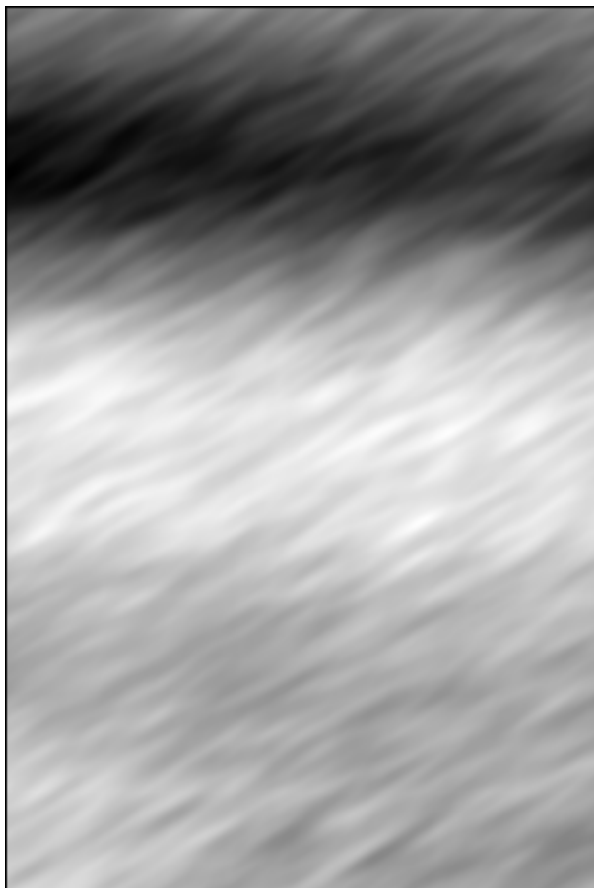


Рис. 7. Результируюащая поверхность (вид сверху)

4. Ракурсная зависимость сигнала, отраженного морской поверхностью

В работе [18] была предложена методика расчета отраженного подстилающей поверхностью сигнала, которая позволяет учитывать параметры РЛ станции. С целью проверки методики моделирования шероховатых поверхностей с произвольной ориентацией слоев выполнялся расчет ракурсной зависимости сигнала, отраженного морской поверхностью, у которой гравитационные волны направлены к наблюдателю, а ветровая рябь – под углом 30° относительно линии визирования (рис. 7). На рис. 8, а представлена зависимость удельной эффективной площади рассеяния от ракурса наблюдения, полученная экспериментально (рис. 8, а) РЛ поляриметром [19]. В эксперименте наблюдалось морское волнение силой 1 балл при направлении ветра 30° относительно гравитационных волн. Сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования (рис. 8, б) подтверждают адекватность предлагаемых моделей.

Заклучение

Для решения задачи моделирования больших участков Земной поверхности со сложной частотной структурой и произвольной ориентацией слоев

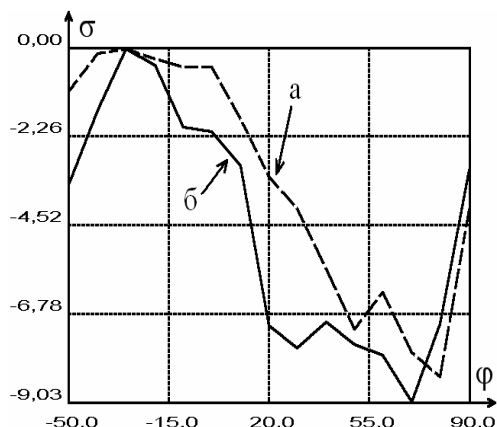


Рис. 8. Ракурсная зависимость сигнала, отраженного морской поверхностью: а – экспериментальные данные; б – данные, полученные в результате моделирования

предложен метод моделирования, в основе которого лежат алгоритмы векторной рекурсивной фильтрации и пространственной линейной интерполяции.

Экспериментальная проверка метода моделирования показала достаточную степень адекватности получаемых моделей, что позволяет применять указанный метод при решении задач электродинамического моделирования РЛ сигналов, отраженных шероховатыми поверхностями со сложной корреляционной структурой.

Литература

1. Козлов А.И. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия / А.И. Козлов, А.И. Логвин, В.А. Сарычев. – М.: Радиотехника, 2007. – 640 с.
2. Волосюк В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко; под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 704 с.
3. Pottier E. *Advanced Concepts (PolSARpro v3.0 Lecture Notes)* [Electronic resource] / E. Pottier, J.-S. Lee, L. Ferro-Famil – 2007. – 65 p. – Downloaded from: <http://earth.esa.int/landtraining07/material.html>.
4. Радиолокационные методы исследования земли / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович и др.; под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
5. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.
6. Кулемин Г.П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами: моногр. / Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. – К.: Наукова думка, 1987. – 232 с.
7. Морская радиолокация / В.И. Винокуров, В.А. Генкин и др.; под ред. В.И. Винокурова. – Л.: Судостроение, 1986. – 256 с.

8. Гусев К.Г. Поляризационная модуляция / К.Г. Гусев, А.Д. Филатов, А.П. Сополев. – М.: Сов. радио, 1974. – 288 с.

9. Козаченко Д.Ю. Лазерный измеритель профиля водной поверхности / Д.Ю. Козаченко // Интегриров. компьют. технологии в машиностр.: тез. докл. Международной научно-технической конференции «ИКТМ' 2009». – Х., 2009. – С. 178.

10. Борцова М.В. Моделирование многомасштабных поверхностей методом векторной рекурсивной фильтрации / М.В. Борцова // *Авиационно-космическая техника и технология* – 2009. – № 1(58). – С. 84-88.

11. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях: пер. с англ. / Дж. Лайтхилл; под ред. П.П. Корякова и П.И. Чушкина. – М.: Мир, 1981. – 560 с.

12. Борцова М.В. Моделирование шероховатых поверхностей методом рекурсивной фильтрации / М.В. Борцова // *Авиационно-космическая техника и технология* – 2007. – № 5. – С. 79-85.

13. Альперт Я.Л. Распространение радиоволн / Я.Л. Альперт, В.Л. Гинзбург, Е.Л. Фейнберг. – М.: ГИИТЛ, 1953. – 883 с.

14. Штагер Е.А. Рассеяние волн на телах сложной формы / Е.А. Штагер, Е.В. Чаевский. – М.: Сов. радио, 1974. – 240 с.

15. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных: пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

16. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство: пер. с англ. / Т. Шуп. – М.: Мир, 1982. – 238 с.

17. Корн Г. Справочник по математике: пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн; под общ. ред. И.Г. Арамано-вича. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

18. Борцова М.В. Моделирование поляриметрических сигналов, отраженных подстилающей поверхностью, с учетом параметров радиолокационной станции / М.В. Борцова, А.В. Попов // *Радиоэлектронные и компьютерные системы* – 2009. – № 4 (38). – С. 33-41.

19. Бабаков М.Ф. Применение поляризационно-модулированных сигналов для селекции и распознавания радиолокационных объектов / М.Ф. Бабаков, А.В. Попов // *Зарубежная радиоэлектроника: Успехи современной радиоэлектроники*. – 1999. – № 11. – С. 45-50.

Поступила в редакцию 10.09.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., начальник отдела радиолокации Г.И. Хлопов, Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков

МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОМАСШТАБНИХ ШОРОХУВАТИХ ПОВЕРХОНЬ З ДОВІЛЬНИМИ КУТАМИ ОРІЄНТАЦІЇ ШАРІВ

М.В. Борцова, А.В. Попов

Для вирішення задачі моделювання радіолокаційних поляриметричних сигналів, відбитих підстилаючою поверхнею, запропоновано модель шорохуватої поверхні як випадкового поля з заданими законом розподілу висот і просторовою кореляційною функцією. Розглянуто недоліки існуючих методів моделювання поверхонь із складною структурою та запропоновано уточнену методику моделювання поверхонь з довільною орієнтацією шарів. Наведено результати розрахунку ракурсної залежності питомої ефективної площі розсіювання морської поверхні, у якій гравітаційні хвилі та вітрові брижі орієнтовані під різними кутами.

Ключові слова: моделювання, двомірний випадковий процес, кореляційна функція, багатомасштабна шорохувата поверхня, рекурсивний фільтр

MODELING POLYSCALE ROUGH SURFACES WITH ARBITRARY LAYER ORIENTATION ANGLES

M.V. Bortsova, A.V. Popov

For solving a task of radar polarimetric signals backscattered by an underlying surface modeling a model of a rough surface as a random field with prescribed distribution law of heights and spatial correlation function is developed. Some drawbacks of the common methods for modeling surfaces with complicated correlation structure are observed and an improved methodology for polyscale surfaces with arbitrary layer orientations modeling is suggested. The results of calculating the cross-section on observation angle dependence for the sea surface that has gravity waves and wind-induced waves oriented under different angles are shown.

Key words: modeling, two-dimensional random process, correlation function, polyscale rough surface, recursive filter

Борцова Мария Викторовна – аспирант кафедры производства радиоэлектронных систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: masha_bortsova@rambler.ru.

Попов Анатолий Владиславович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры производства радиоэлектронных систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.v.popov@inbox.ru.