

УДК 621.391

М.В. БОРЦОВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОМАСШТАБНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ ВЕКТОРНОЙ РЕКУРСИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Для решения задач моделирования радиолокационных поляриметрических сигналов, отраженных подстилающими поверхностями, предложена модель шероховатой поверхности как случайного поля с заданными законом распределения высот и пространственной корреляционной функцией. Сформулированы требования, предъявляемые к алгоритмам моделирования многомасштабных поверхностей. Рассмотрены основные недостатки традиционных алгоритмов моделирования случайных полей. Предложен метод моделирования многомасштабных поверхностей, основанный на алгоритмах векторной рекурсивной фильтрации и линейной пространственной интерполяции, обеспечивающий построение шероховатых поверхностей больших размеров (порядка 1×1 км) с шагом 1 мм. Приводятся результаты моделирования трехмасштабной шероховатой поверхности.

Ключевые слова: моделирование, подстилающая поверхность, корреляционная функция, многомасштабная поверхность, пространственная интерполяция, рекурсивная фильтрация.

Введение

Для решения таких задач дистанционного зондирования (ДЗ) с аэрокосмических носителей как дистанционное определение свойств земных покровов, обнаружение малоразмерных объектов в условиях интенсивных помех от подстилающих поверхностей и др. [1], необходима информация об общих закономерностях влияния свойств различных участков земных естественных и искусственных поверхностей на отраженный от них сигнал, регистрируемый радиолокационными станциями (РЛС). Для выявления такого рода зависимостей требуется большой объем экспериментальных данных, полученных для различных объектов ДЗ в различных условиях наблюдения, а также наличие данных наземного контроля. Сложность проведения экспериментальных исследований, а иногда и их принципиальная невозможность, обуславливают необходимость математического моделирования радиолокационных (РЛ) сигналов, отраженных подстилающими поверхностями.

В работах [2 – 6] было обосновано теоретически и показано на основании экспериментальных данных, что величина РЛ сигнала, отраженного подстилающей поверхностью, зависит не только от электрофизических свойств среды (проводимости и диэлектрической проницаемости) и от параметров РЛС (длины волны, мощности излучаемого сигнала, поляризации и т.п.), но и от профиля облучаемой поверхности. То есть, для решения задачи моделирования отраженных РЛ сигналов необходима разработка алгоритмов моделирования подстилающих

поверхностей с заданным профилем. При этом моделируемая поверхность должна воспроизводить свойства реальной земной поверхности, быть связанной (не иметь разрывов производной) и обладать достаточно большими геометрическими размерами для устранения краевых эффектов при моделировании процессов отражения РЛ сигналов.

В данной статье рассмотрены основные недостатки существующих методов моделирования шероховатых поверхностей (ШП) и предложен метод моделирования многомасштабных поверхностей, основанный на алгоритмах векторной рекурсивной фильтрации и линейной пространственной интерполяции. Приводятся результаты моделирования поверхностей со сложной частотной структурой.

Цель работы – разработка алгоритмов моделирования ШП, воспроизводящих свойства реальных подстилающих поверхностей.

1. Моделирование ШП с простой частотной структурой

Любую однородную связную шероховатую поверхность можно представить в виде двумерного случайного процесса $h(x, y)$ с заданным законом распределения высот и их двумерной корреляционной функцией (КФ) $R(\tau_x, \tau_y)$:

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

или двумерной частотной характеристикой (ЧХ) $W(f_x, f_y)$, которая связана с двумерной КФ преобразованием Фурье.

При дискретном представлении процесса его соседние точки образуют площадки четырехугольной формы – facets, для которых может выполняться расчет отраженных сигналов.

При размерах facetsа много меньше длины волны ($\lambda/32$ и менее) его можно считать элементарным отражателем [7], что позволит применять теорию Гюйгенса при моделировании отраженных от поверхности сигналов [8].

При частоте РЛ сигнала 10 ГГц длина волны составляет 3,2 см, и для того, чтобы отдельный facet можно было рассматривать как элементарный отражатель, необходимо, чтобы его геометрические размеры не превышали 1 мм.

Общий вид предлагаемой модели представлен на рис. 1.

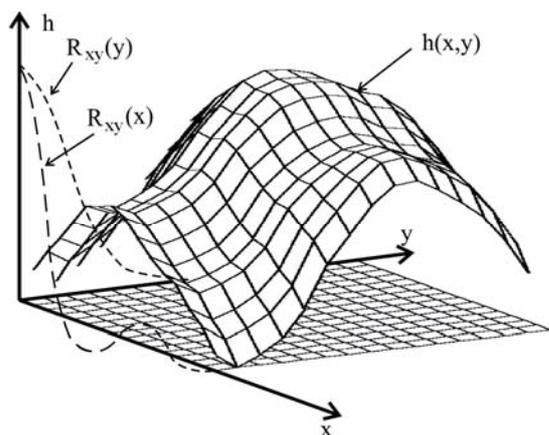


Рис. 1. Общий вид модели поверхности

Задача моделирования поверхности в этом случае сводится к моделированию случайного двумерного процесса с заданной двумерной корреляционной функцией высот и шагом между отсчетами процесса не более $\lambda/32$.

Для устранения краевых эффектов размеры моделируемой поверхности должны быть не меньше размеров площадки, освещаемой лучом антенны радиолокационной станции в пределах одного импульса.

Так, при ширине диаграммы направленности 3° , длине импульса 1 мкс и дальности 10 км размеры моделируемой поверхности должны быть не менее $550\text{м} \times 300\text{м}$.

В работе [9] было показано, что известные методы моделирования двумерных случайных процессов с заданными двумерными корреляционными функциями, такие как метод двумерной линейной свертки и спектральный метод [10], не позво-

ляют моделировать ШП больших размеров, так как требуют значительных временных затрат на процесс моделирования и предъявляют чрезмерно высокие требования к электронно-вычислительным средствам (в частности, к размерам оперативной памяти ЭВМ).

Также в [9] был предложен новый метод, основанный на алгоритмах векторной рекурсивной фильтрации, который хорошо зарекомендовал себя при моделировании подстилающих поверхностей с простой частотной структурой.

Тем не менее, при моделировании следует учитывать, что многие типы поверхностей Земли (в частности, морская поверхность) характеризуются широкополосным пространственным спектром [6, 11 – 13]. Так, например, в структуре морского волнения выделяют гравитационные и капиллярные волны, а также ветровую рябь, и каждому из указанных видов волнений соответствует свой спектральный диапазон [11, 14].

Следует отметить, что применение метода векторной рекурсивной фильтрации для моделирования шероховатых поверхностей со сложной частотной структурой возможно, однако при этом требуется использовать сложные формирующие фильтры высоких порядков, что значительно усложняет процесс разработки алгоритма моделирования и повышает временные затраты на моделирование поверхности.

В связи с изложенным предлагается метод моделирования шероховатых поверхностей со сложной частотной структурой как многомасштабных поверхностей, представляющих собой суперпозицию ряда поверхностей с простой частотной структурой (рис. 2).

2. Моделирование ШП со сложной частотной структурой

Для решения задачи моделирования шероховатых поверхностей со сложной частотной структурой предлагается следующая методика моделирования:

– широкополосный пространственный спектр требуемой шероховатой поверхности разбивается на серию из n узкополосных спектров (рис. 2, 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];

– выполняется моделирование n поверхностей с узкополосным пространственным спектром с соответствующими шагами дискретизации по координатам методом векторной рекурсивной фильтрации [9] (рис. 2, д – ж);

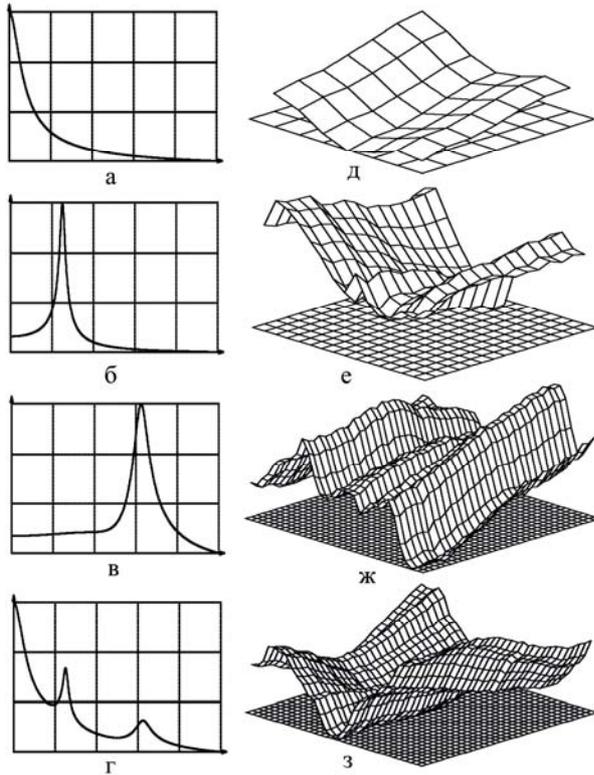


Рис.2. Методика моделирования многомасштабных поверхностей

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

– полученные в результате интерполяции поверхности центрируются и нормируются;

– осуществляется суммирование n поверхностей с требуемыми коэффициентами, соответствующими высотам (рис. 2, з).

В силу линейности преобразования Фурье суммирование поверхностей обеспечивает суммирование спектров (рис. 2, г), следовательно, широкополосный спектр результирующей поверхности будет представлять собой суперпозицию исходных узкополосных пространственных спектров.

3. Анализ результатов моделирования

Для проверки предлагаемой методики осуществлялось моделирование трехмасштабной шероховатой поверхности. На рис. 3 – 5 представлены шероховатые поверхности с узкополосным пространственным спектром, на рис. 6 – результирующая поверхность, представляющая собой суперпозицию исходных поверхностей.

Заключение

Для решения задачи моделирования больших участков Земной поверхности со сложной частотной



Рис. 3. Крупномасштабная поверхность (вид сверху)

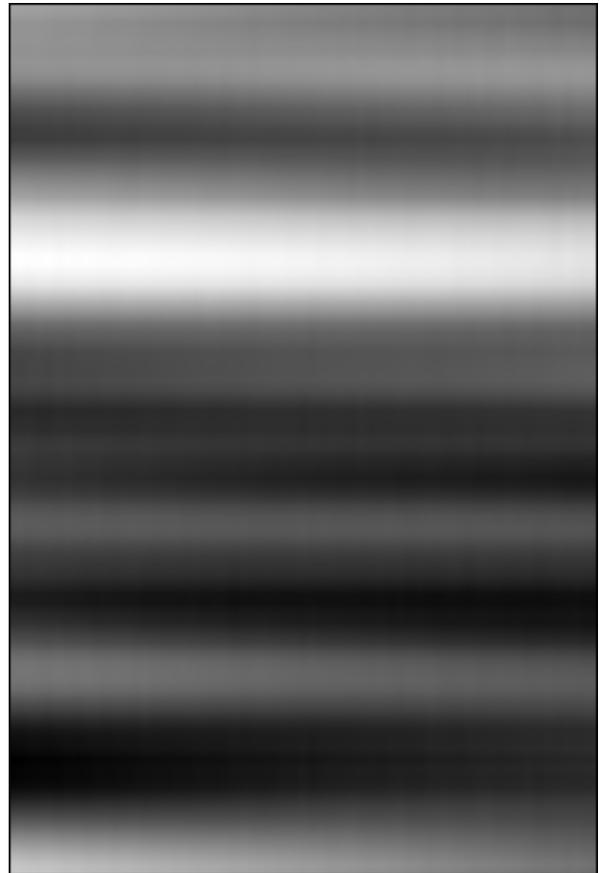


Рис. 4. Среднемасштабная поверхность (вид сверху)

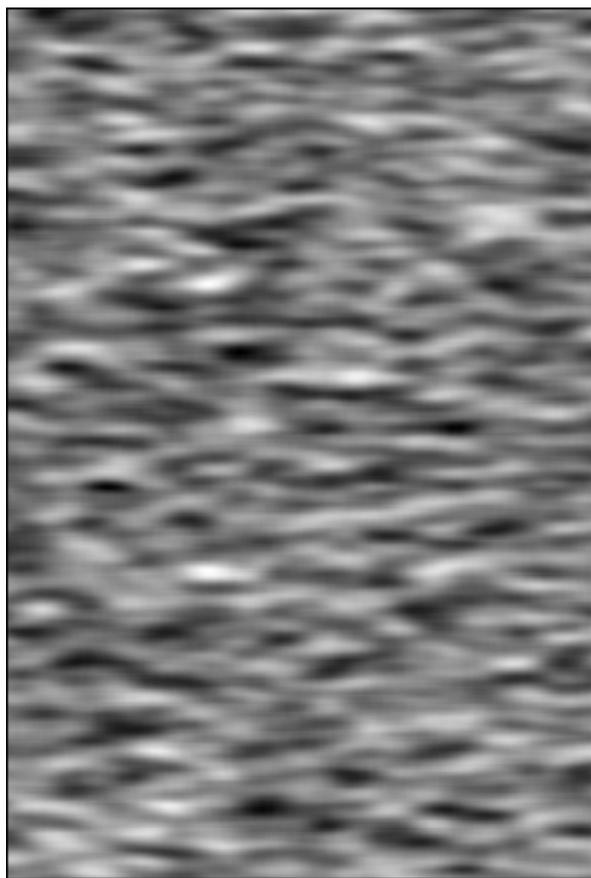


Рис. 5. Мелкомасштабная поверхность (вид сверху)

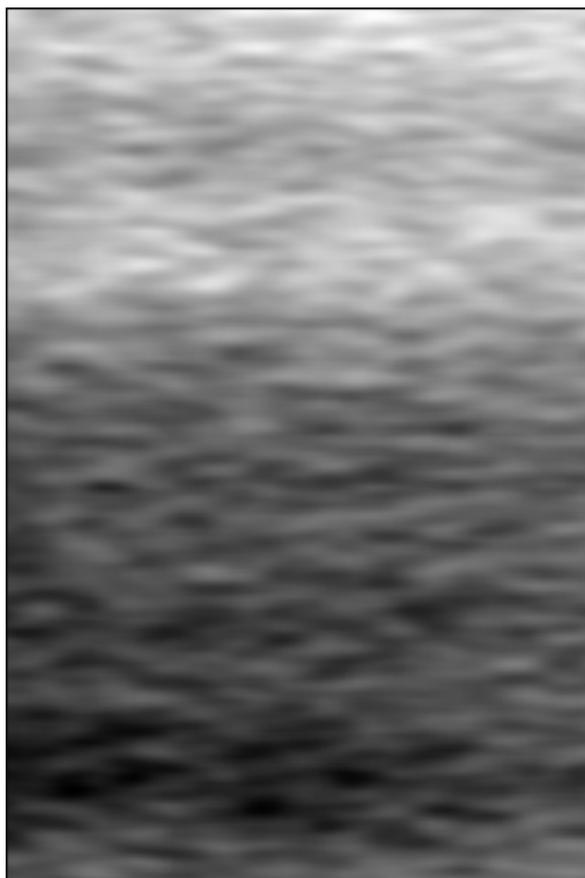


Рис. 6. Результирующая поверхность (вид сверху)

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

Анализ результатов моделирования показал достаточную степень адекватности получаемых моделей, что в дальнейшем позволит применять указанный метод при решении задач электродинамического моделирования отраженных РЛ сигналов.

Литература

1. Popov A.V. *Informability of Polarimetric Radar Invariants* / A.V. Popov, A. Pogrebnyak // *Proceedings of SPIE, Earth Observing Systems VIII*. – 2003. – Vol. 5151. – P. 74-84.
2. *Радиолокационные методы исследования земли* / Ю.А. Мельник, С.Г. Зубкович и др.; под ред. Ю.А. Мельника. – М.: Сов. радио, 1980. – 264 с.
3. Кулемин Г.П. *Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами: моногр.* / Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. – К.: Наукова думка, 1987. – 232 с.
4. Weissman D.E. *Measurements of the Effect of Rain-Induced Sea Surface Roughness on the QuikSCAT Scatterometer Radar Cross Section* / D.E. Weissman, M.A. Bourassa // *IEEE Transactions on Geoscience and*

Remote Sensing. – 2008. – Vol. 46, iss. 10, part 1. – P. 2882-2894.

5. Plant N.G. *Ocean Wavenumber Estimation From Wave-Resolving Time Series Imagery* / N.G. Plant, K.T. Holland, M.C. Haller // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2008. – Vol. 46, iss. 9. – P. 2644-2658.

6. Yildiz S. *On the Scattering of Electromagnetic Waves by Periodic Rough Dielectric Surfaces: A BOA Solution* / S. Yildiz, Y. Altuncu, A. Yapar, I. Akduman // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2008. – Vol. 46, iss. 9. – P. 2599-2606.

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

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

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

10. Быков В.В. *Цифровое моделирование в статистической радиотехнике* / В.В. Быков. – М.: Сов. радио, 1971. – 440 с.

11. *Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС* / Н.П. Красюк, В.Л. Коблов, В.Н. Красюк. – М.: Радио и связь, 1988. – 216 с.

12. Kulemin G.P. *Spatial Characteristics of Soil* / G.P. Kulemin, E.V. Tarnavsky // *Telecommunication and Radio Engineering*. – 2003. – Vol. 59, No. 3 – 4. – P. 141-150.

13. Kulemin G.P. *Spatial Statistical Characteristics of Land and Development of Radar Clutter Maps* / G.P. Kulemin, E.V. Tarnavsky // *Proc. SPIE*. – 2004. – Vol. 5410A. – P. 162-173.

14. Zavorotny V.U. *Two-Scale Model and Ocean Radar Doppler Spectra at Moderate- and Low-Grazing*

Angles / V.U. Zavorotny, A.G. Voronovich // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1998. – Vol. 46, No 1. – P. 84-92.

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.

Поступила в редакцию 2.12.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф., директор ГНТЦ «Природа» Г.Я. Красовский, Северо-Восточный филиал Национального агентства Украины, Харьков.

МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОМАСШТАБНИХ ПОВЕРХОНЬ МЕТОДОМ ВЕКТОРНОЇ РЕКУРСИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

М.В. Борцова

Для вирішення задач моделювання радіолокаційних поляриметричних сигналів, відбитих підстилаючими поверхнями, запропонована модель шорохуватої поверхні як випадкового поля з заданими законом розподілу висот та просторовою кореляційною функцією. Сформульовані вимоги, що пред'являються до алгоритмів моделювання багатомасштабних поверхонь. Розглянуті основні недоліки традиційних алгоритмів моделювання випадкових полів. Запропоновано метод моделювання багатомасштабних поверхонь, в основі якого лежать алгоритми векторної рекурсивної фільтрації та лінійної просторової інтерполяції, що забезпечує побудову шорохуватих поверхонь великих розмірів (близько 1×1 км) з шагом 1 мм. Приведені результати моделювання трьохмасштабної шорохуватої поверхні.

Ключові слова: моделювання, підстилаючі поверхня, кореляційна функція, багатомасштабна поверхня, просторова інтерполяція, рекурсивна фільтрація.

POLYSCALE SURFACES MODELING USING THE METHOD OF VECTOR RECURSIVE FILTERING

M.V. Bortsova

For solving problems of radar polarimetric signals backscattered by underlying surfaces modeling a model of a rough-surface is suggested. According to this model a surface is presented as a random field with prescribed distribution of heights and spatial correlation function. Requirements produced to the algorithms for modeling polyscale surfaces are formulated. Primary drawbacks of the traditional random fields modeling methods are considered. A polyscale surfaces modeling method is suggested. This new method is based on the vector recursive filtering and linear spatial interpolation algorithms. It allows generating rough surfaces of large dimensions (about 1×1 km) with discretization step 1 mm. The results of a three-scaled rough surface modeling are shown.

Key words: modeling, underlying surface, correlation function, polyscale surface, spatial interpolation, recursive filtering.

Борцова Мария Викторовна – аспирант кафедри виробництва радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАИ», Харьков, Україна, e-mail: ma-sha_bortsova@rambler.ru.