УДК 621.391

М.В. БОРЦОВА

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТОДОМ РЕКУРСИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Проведен анализ существующих методов моделирования случайных полей с заданными корреляционными свойствами применительно к задаче моделирования морской поверхности. Показано, что существующие методы не позволяют выполнять моделирование больших участков. Предложено использовать метод двумерной рекурсивной фильтрации с оптимизацией параметров фильтра по пространственным частотным характеристикам поверхности. Приводятся результаты моделирования поверхностей с различными корреляционными свойствами.

моделирование, подстилающая поверхность, корреляционная функция, рекурсивный фильтр

Введение

При решении задач дистанционного зондирования (ДЗ) с аэрокосмических носителей значительный интерес представляет исследование рассеяния электромагнитных волн различными участками земных естественных и искусственных поверхностей. Радиолокационный (РЛ) сигнал, отраженный от подстилающей поверхности, существенно зависит от большого числа факторов, связанных как с ее электрофизическими свойствами, так и с геометрическими характеристиками, что значительно усложняет процесс обработки радиолокационной информации.

Для исследования такого рода зависимостей требуется большой объем радиолокационных данных, полученных от различных типов подстилающих поверхностей. Сложность проведения экспериментальных исследований, а иногда и их принципиальная невозможность, обуславливают необходимость математического моделирования радиолокационных сигналов, отраженных различными типами поверхностей, что, в свою очередь, требует разработки алгоритмов моделирования поверхностей с заданными геометрическими и электрофизическими свойствами. При этом модель поверхности должна сохранять корреляционные и вероятностные свойства реальной поверхности. Моделируемая поверхность должна быть связной (т.е. не иметь разрывов производной) и обладать достаточно большими геометрическими размерами для устранения краевых эффектов при моделировании процессов отражения радиолокационных сигналов.

В данной статье проводится анализ существующих методов моделирования случайных полей (СП) с заданными корреляционными свойствами и исследуется возможность их применения для моделирования больших участков морской поверхности. Рассматриваются недостатки традиционных методов, препятствующие решению поставленной задачи, и предлагается метод, основанный на алгоритмах векторной рекурсивной фильтрации (РФ). Приводятся результаты моделирования поверхностей с различными корреляционными свойствами.

1. Постановка задачи моделирования

В ряде работ ([1 – 3 и др.]) было показано, что величина РЛ сигнала, отраженного от земной (морской) поверхности, зависит не только от электрофизических свойств среды (проводимости и диэлектрической проницаемости) и параметров аппаратуры (длины волны, излучаемой мощности, поляризации и т.п.), но и от профиля облучаемой поверхности.

© М.В. Борцова

Известны четыре основные модели подстилающей поверхности, характеризующие ее профиль [4]: зеркальная (например, поверхность воды при абсолютном штиле); мелкошероховатая с размерами неровностей много меньше длины волны (поверхность асфальта или бетона для сантиметрового диапазона волн); пологая крупношероховатая поверхность, на высоту неровностей которой ограничения не накладываются («мертвая» зыбь на море) и поверхности со сложной шероховатостью (поверхность моря при развитом волнении, когда она покрыта как крупными первичными волнами, так и волнами более мелких размеров, вплоть до мелкой ряби). Также условно выделяют [1] периодические (например, морская) и непериодические (гравий, травяной покров) поверхности.

Любую однородную шероховатую поверхность можно представить как двумерный случайный процесс $h(x_i, y_j)$ с некоторой двумерной корреляционной функцией (КФ) высот $R(\tau_x, \tau_y)$:

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

При дискретном представлении процесса его соседние точки образуют площадки четырехугольной формы – фацеты, для которых выполняется расчет отраженных сигналов. При размерах фацета много меньше длины волны ($\lambda/32$ и менее) его можно считать элементарным отражателем [5], что позволит применять теорию Гюйгенса при моделировании отраженных от поверхности сигналов [6]. При частоте РЛ сигнала 10 ГГц длина волны составляет 3,2 см, и для того, чтобы отдельный фацет можно было рассматривать как элементарный отражатель, необходимо, чтобы его геометрические размеры не превышали 1 мм. Общий вид предлагаемой модели представлен на рис. 1.

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 1 мм. 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 550м×300м.

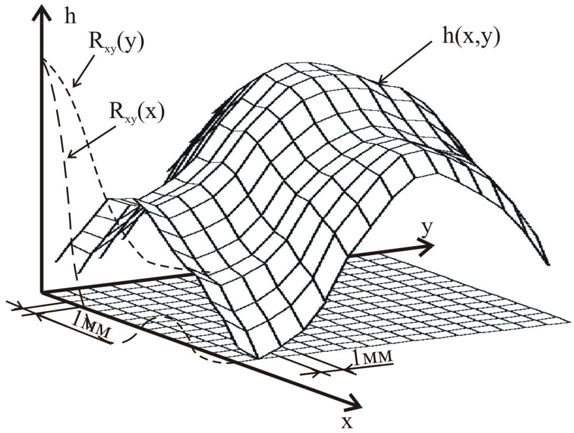


Рис. 1. Общий вид модели поверхности

2. Методы моделирования СП

Существует два основных метода моделирования двумерных процессов с заданной КФ – метод двумерной линейной свертки и спектральный метод [7].

При использовании метода двумерной линейной свертки дискретный случайный двумерный процесс с заданной КФ можно получить путем вычисления свертки исходного некоррелированного процесса $n(x, y)$ с требуемой КФ $R(x, y)$:

$$h(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} n(\xi, \eta) \cdot R(x - \xi, y - \eta) d\xi\, d\eta . \quad (2)$$

Алгоритм моделирования следующий:

– формируется выборка некоррелированного случайного процесса $n_{i,j}$, $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, M}$ с заданной плотностью распределения высот;

– выполняется дискретизация заданной корреляционной функции $R(\tau_x, \tau_y) \Rightarrow R_{i,j}$, $i, j = \overline{1, K}$;

– вычисляются отсчеты искомого процесса $h_{i,j}$

как свертка некоррелированной выборки $n_{i,j}$ с дискретной корреляционной функцией $R_{i,j}$:

$$h_{ij} = \sum_{k_1=0}^{K} \sum_{k_2=0}^{K} n_{k_1 k_2} \cdot R_{i-k_2, j-k_2}. \quad (3)$$

Для реализации данного метода на ЭВМ необходимо хранить в оперативной памяти одновременно два массива размерами $K \times K$. Величина K зависит от радиуса корреляции поверхности, который представляет собой интервал, на котором корреляционная функция отлична от нуля. Радиус корреляции морской поверхности может составлять более 10 м [4]. При шаге дискретизации 1 мм размеры одного массива $K \times K$ будут составлять $10^4 \times 10^4 = 10^8$ точек. При условии, что для хранения одного числа в памяти ЭВМ необходимо 4 байта, потребуется 382 Мбайта оперативной памяти. Для двух массивов, соответственно, необходимо 764 Мбайт, что не всегда возможно. Кроме того, рассмотренный алгоритм требует больших временных затрат на вычисление двумерной свертки, что затрудняет его практическое применение.

В основе спектрального метода моделирования лежит теорема Винера-Хинчина [7], согласно которой корреляционная функция процесса связана с его спектральной плотностью мощности через преобразование Фурье, что позволяет выполнять вычисления в частотной области. Двумерные прямое и обратное преобразования Фурье [7] записываются, соответственно, как:

$$S(\omega_1, \omega_2) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} s(t_1, t_2) e^{-j\omega_1 t_1} e^{-j\omega_2 t_2} dt_1 dt_2, \quad (4)$$

$$s(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega_1, \omega_2) e^{j\omega_1 t_1} e^{j\omega_2 t_2} d\omega_1 d\omega_2, \quad (5)$$

где $s(t_1, t_2)$, $S(\omega_1, \omega_2)$ – сигналы соответственно в пространственной и частотной области.

Алгоритм моделирования заключается в следующем:

– формируется выборка некоррелированного случайного процесса $n_{i,j}$, $i = 1, N$, $j = 1, M$ с заданной плотностью распределения высот;

– по заданной КФ с помощью прямого двумерного преобразования Фурье (4) определяется форма двумерного формирующего фильтра $S_{xy}(\omega_x, \omega_y)$;

– вычисляется спектр исходного процесса $N(\omega_x, \omega_y)$ как прямое двумерное преобразование Фурье (4) процесса $n_{i,j}$;

– рассчитывается спектр результирующего двумерного коррелированного процесса:

$$H(\omega_x, \omega_y) = S_{xy}(\omega_x, \omega_y) \cdot N(\omega_x, \omega_y); \quad (6)$$

– вычисляются реализации процесса $h_{i,j}$ как обратное преобразование Фурье (5) от спектра $H(\omega_x, \omega_y)$.

Недостатком данного метода является то, что в нем не учитывается информация о фазовом спектре, что может приводить к искажению корреляционной структуры процесса. Кроме того, данный метод не позволяет выполнять моделирование поверхности по частям. Тогда при размерах моделируемого поля 550м×300м с шагом дискретизации 1 мм необходимо одновременно хранить в памяти ЭВМ два массива размерами $5{,}5 \cdot 10^5 \times 3 \cdot 10^5$ точек, для чего необходимо порядка 1,2 Терабайта оперативной памяти, что на данном уровне развития вычислительной техники невозможно. Таким образом, спектральный метод моделирования случайных коррелированных полей также неприменим для моделирования морской поверхности.

3. Моделирование СП методом РФ

Из приведенного выше анализа видно, что применение традиционных спектрального метода и метода двумерной линейной свертки для моделирования больших участков морской поверхности затруднительно или вообще невозможно. Поэтому может быть предложен метод моделирования, в основе которого лежат алгоритмы двумерной рекурсивной фильтрации. Следует отметить, что теория цифровой рекурсивной фильтрации для одномерных динамических систем [7] (систем с одним входом и одним выходом, рис. 2, а) и векторных систем [7] с n входов$\times m$ выходов (рис. 2, б) широко освещена в литературе, однако анализ случаев двумерных рекурсивных цифровых фильтров для систем, имеющих один вход, один выход, но два пути движения сигнала (рис. 2, в), в доступных автору источниках проведен не был.

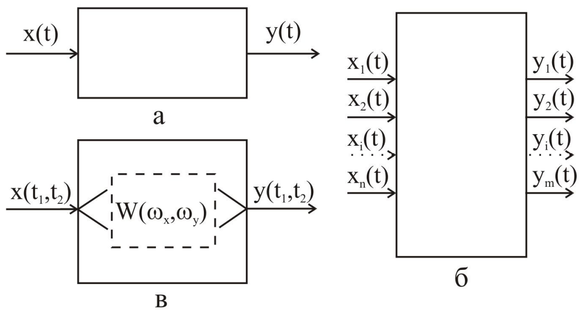


Рис. 2. Виды динамических систем

Цифровые рекурсивные фильтры – это устройства, реализующие преобразование вида

$$y_i = \sum_{k=0}^{K} a_k \cdot x_{i-k} - \sum_{k=1}^{M} b_k \cdot y_{i-k}\ , \qquad (7)$$

где y_i – отсчеты выходного сигнала; a_k, b_k – постоянные коэффициенты; K, M – порядок фильтра; x_i – отсчеты входного сигнала.

Отличительной особенностью рекурсивных фильтров является то, что они используют не только значения входного сигнала, но и предшествующие значения выходного сигнала, которые также рассматриваются как вход фильтра.

Предлагается расширить теорию одномерной цифровой РФ на двумерные процессы (системы, представленные на рис. 2, в). Двумерный цифровой рекурсивный фильтр будет иметь вид:

$$y_{i,j} = \sum_{k=0}^{K} \sum_{m=0}^{L} a_{k,m}\, x_{i-k,\,j-m} -$$

$$- \sum_{k=1}^{M} \sum_{k=1}^{N} b_{k,m}\, y_{i-k,\,j-m}\ . \qquad (8)$$

Теперь предположим, что существует двумерный цифровой фильтр вида (8), на вход которого подаются отсчеты некоррелированного двумерного процесса $n(x_i, y_j)$, а на выходе получаются отсчеты коррелированного процесса $h(x_i, y_j)$ с заданной корреляционной функцией $R(\tau_x, \tau_y)$. Задача проектирования такого фильтра сводится к определению порядка фильтра, необходимого для обеспечения заданной корреляционной функции, и нахождению коэффициентов фильтра.

Порядок фильтра определяется исходя из соотношения допустимых временных затрат на моделирование поверхности и необходимой точности реализации заданной корреляционной функции. Задачу нахождения коэффициентов предлагается решать оптимизационными методами [8]. При этом целевая функция оптимизации может быть записана как

$$Q_R(\vec{a}, \vec{b}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Big[R_\Phi(\vec{a}, \vec{b}, x, y) -$$

$$- R_T(\vec{a}, \vec{b}, x, y) \Big]^2 dx\, dy\ , \qquad (9)$$

где $R_\Phi(\vec{a}, \vec{b}, x, y)$, $R_T(\vec{a}, \vec{b}, x, y)$ – соответственно фактическая и требуемая двумерные КФ.

Анализ показал, что целевая функция вида (9) является полимодальной, что значительно затрудняет процесс поиска оптимальных решений. Поэтому на основании теоремы Винера-Хинчина можно осуществить переход от целевой функций, выраженной через двумерные корреляционные функции, к целевой функции, записанной через двумерные передаточные характеристики:

$$Q_W(\vec{a}, \vec{b}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Big[W_\Phi(\vec{a}, \vec{b}, \omega_x, \omega_y) -$$

$$- W_T(\vec{a}, \vec{b}, \omega_x, \omega_y) \Big]^2 d\omega_x\, d\omega_y\ , \qquad (10)$$

где $W_\Phi(\vec{a}, \vec{b}, \omega_x, \omega_y)$, $W_T(\vec{a}, \vec{b}, \omega_x, \omega_y)$ – соответственно фактическая и требуемая двумерные передаточные характеристики.

4. Анализ результатов моделирования

Для проверки предложенного метода выполнялось моделирование поверхностей с различными корреляционными свойствами. В качестве заданной корреляционной функции была принята функция, предложенная в [3]:

$$R(x,y) = e^{-\frac{1}{R_x}x - \frac{1}{R_y}y} \cos(2\pi f_x x)\cdot\cos(2\pi f_y y), \quad (11)$$

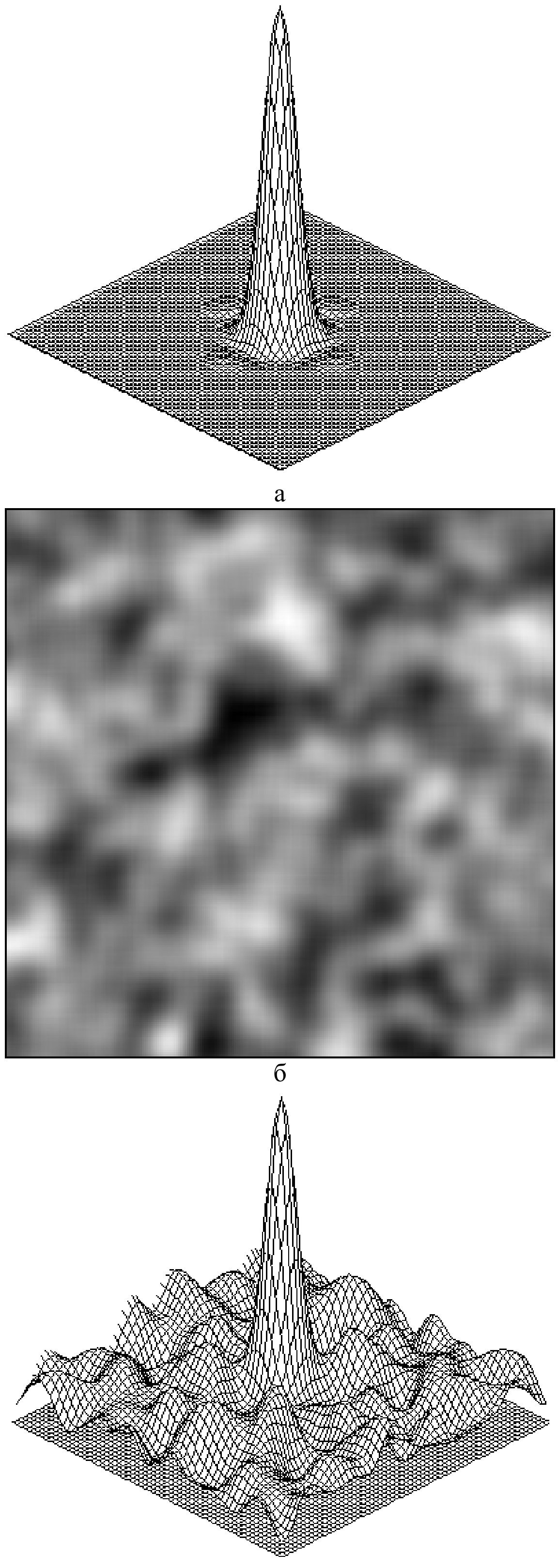
где R_x, R_y – радиусы корреляции поверхности вдоль направлений x, y;

f_x, f_y – пространственные частоты вдоль направлений x, y.

Данная КФ позволяет моделировать как мелкошероховатые, так и крупношероховатые, как периодические, так и непериодические поверхности. Поскольку корреляционная теория полностью справедлива только для гауссовских процессов, то в качестве исходного некоррелированного поля принимался двумерный случайный процесс с нормальным законом распределения. Оптимизация выполнялась по критерию (10). При оптимизации использовался метод конфигураций Розенброка [8], который основан на поиске минимума вдоль линий разрыва производных и часто оказывается эффективным, когда другие методы не позволяют получить решение. Выходной процесс формировался методом двумерной цифровой РФ по алгоритму (8).

На рис. 3 – 6 представлены результаты моделирования поверхностей с различными корреляционными свойствами.

Анализ результатов моделирования показывает, что предложенный метод двумерной рекурсивной фильтрации позволяет решать поставленные задачи, а именно, моделировать связные поверхности с различными заданными корреляционными свойствами. Некоторое несоответствие заданной и результирующей корреляционных функций объясняется стохастической природой моделируемой поверхности.



а

б

в

Рис. 3. Непериодическая поверхность (радиусы корреляции $R_x = 10^{-3}$ м, $R_y = 10^{-3}$ м):

а – заданная корреляционная функция;
б – результирующая поверхность (вид сверху);
в – результирующая корреляционная функция

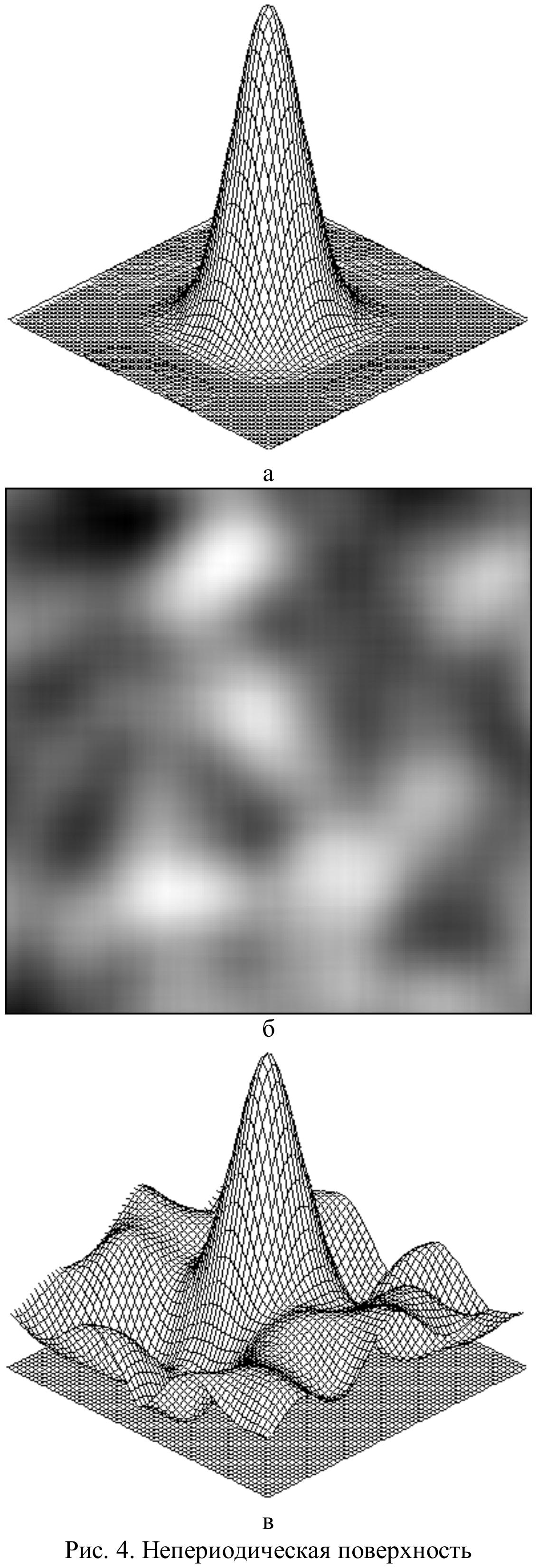


Рис. 4. Непериодическая поверхность (радиусы корреляции $R_x = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $R_y = 5 \cdot 10^{-3}$ м):
а – заданная корреляционная функция;
б – результирующая поверхность (вид сверху);
в – результирующая корреляционная функция

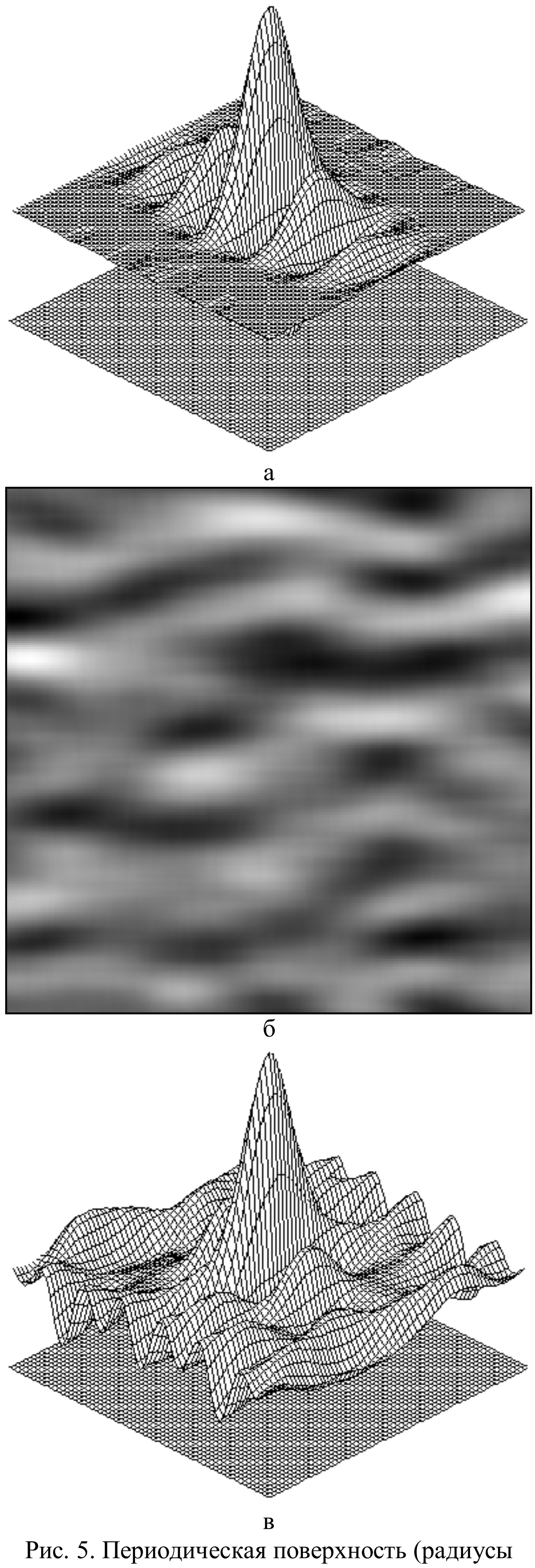
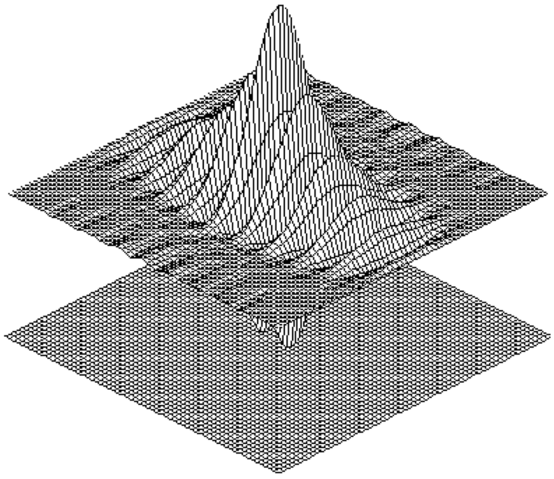
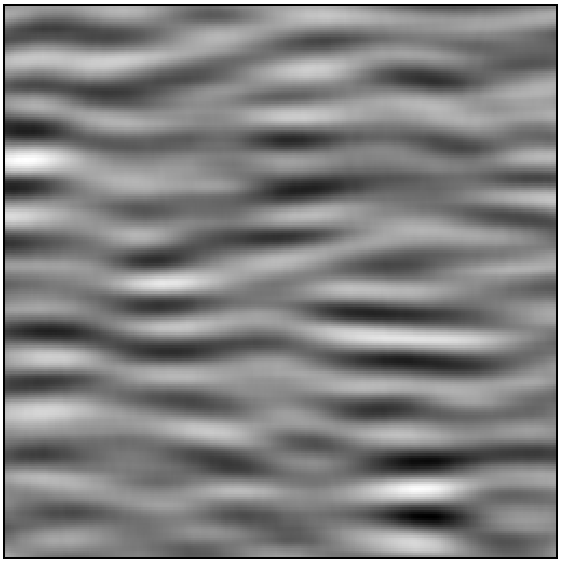


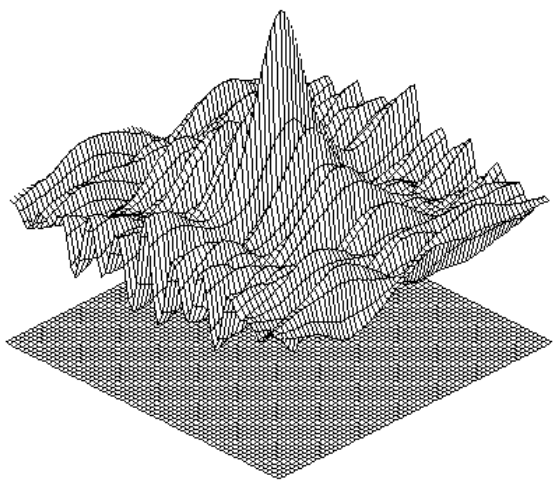
Рис. 5. Периодическая поверхность (радиусы корреляции $R_x = 10^{-3}$ м, $R_y = 10^{-3}$ м, пространственные частоты $f_x = 0$, $f_y = 10\,\text{м}^{-1}$):
а – заданная корреляционная функция;
б – результирующая поверхность (вид сверху);
в – результирующая корреляционная функция



а



б



в

Рис. 6. Периодическая поверхность
(радиусы корреляции $R_x = 10^{-3}$ м, $R_y = 10^{-3}$ м;
пространственные частоты $f_x = 0$, $f_y = 20\,\text{м}^{-1}$):
а – заданная корреляционная функция;
б – результирующая поверхность (вид сверху);
в – результирующая корреляционная функция

Заключение

Для решения задачи моделирования больших участков морской поверхности предложен метод двумерной РФ, позволяющий формировать поверхности с заданной КФ. Анализ результатов моделирования показал достаточную степень адекватности получаемых поверхностей, что позволит в дальнейшем применять предложенный метод при решении задач электродинамического моделирования.

Литература

1. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Сколника. – Нью-Йорк, 1970. Том 1. Основы радиолокации / Под ред. Я.С. Ицхоки. – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.

2. Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. – М.: Сов. радио, 1968. – 224 с.

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

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

6. Альперт Я.Л., Гинзбург В.Л., Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн. – М.: ГИТТЛ, 1953. – 883 с.

7. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.

8. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство. Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 238 с.

Поступила в редакцию 18.09.2007

Рецензент: канд. техн. наук, ст. науч. сотр. А.М. Резниченко, ОНИИ Вооруженных Сил, Харьков.