

УДК: 087.2 + 537.87

DOI: 10.26907/rwp29.2025.372-374

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ РЕЛЬЕФНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Я.А. Илюшин^{1,2}, Чжао Хунли²

¹Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул.

Моховая 11, корп. 7.

E-mail: ilyushin@phys.msu.ru

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119992, Россия, г.

Москва, Ленинские горы, МГУ

E-mail: zhao.h21@physics.msu.ru

Аннотация. В работе исследуется отражение плоских волн и радиолокационных сигналов с синтезированной апертурой от статистически шероховатых поверхностей с экспоненциальной корреляционной функцией высот рельефа. Предлагаются аппроксимации корреляционной функции суммами гауссовых слагаемых, позволяющие реализовать эффективный расчетный алгоритм. Результаты расчетов сравниваются с известными асимптотическими законами диффузного отражения волн от случайных поверхностей. Предлагаемая техника вычислений допускает применение к широкому классу задач отражения монохроматических и импульсных волновых полей различных конфигураций источников от рельефных поверхностей рассмотренного типа.

Ключевые слова: радиолокация, сечение рассеяния, корреляционная функция, рельеф

SYNTHETIC APERTURE RADAR REFLECTIONS FROM EXPONENTIALLY CORRELATED SURFACES

Ya.A. Ilyushin, Zhao Hongli

Abstract. The reflection of plane waves and radar signals, with a synthesized aperture, from statistically rough surfaces with an exponential correlation function for heights, is considered and investigated in the paper. We propose approximations of the correlation function using superpositions of Gaussian functions. This results in the possibility for developing an effective practical algorithm for simulating radar echoes. The results are verified against previously published laws for diffuse reflection of waves from random surfaces. The computational approach proposed here can be applied to a wide range of situations where reflection occurs from stationary and transient wavefields of different configurations of wave sources on rough surfaces similar to those considered here.

Keywords: radar location, clutter, scattering cross section

Введение

Расчет отражений электромагнитных волн от шероховатых поверхностей [1,2] является значительной проблемой, актуальной для практического применения волн оптического и радиодиапазона. В силу значительного размера рассеивающего объекта (поверхности) по сравнению с длиной волны вычислительная трудоемкость задачи численного расчета отраженного сигнала пока не позволяет решить её из первых принципов.

В настоящее время основным подходом для таких расчетов является приближение Кирхгофа. Расчет отраженного поля в этом приближении сводится к интегрированию заданной (комплексной) амплитуды поля падающей электромагнитной волны по поверхности фазового экрана с функцией Грина параболического уравнения дифракции [3]. В рамках этого подхода применяются идеализированные модели рельефа поверхности, как детерминированные, так и статистические [1, 2]. Среди статистических важнейшими являются модели с экспоненциальной и гауссовой корреляционной функцией высоты рельефа [4–6].

Экспоненциальная модель подвергалась критике за негладкость поверхности, т.е. бесконечное значение среднеквадратичного наклона. Тем не менее, опытные данные радиолокационного зондирования небесных тел свидетельствуют в пользу этой модели, т.к. находятся с ней в наилучшей степени согласия.

С вычислительной точки зрения, гауссовская модель более гибкая и предоставляет вычислителю больше возможностей по сравнению с экспоненциальной, в т.ч. позволяет выразить большее число возникающих в этих задачах интегралов в замкнутой аналитической форме.

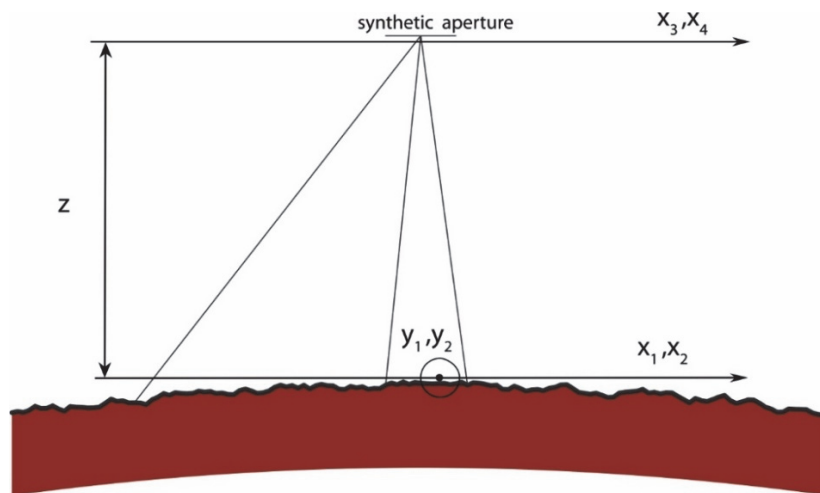


Рис. 1. Схематическое изображение радиолокации рельефной поверхности с синтезом апертуры

Аналитические результаты на основе экспоненциальной модели в основном ограничены сечениями радиолокационного рассеяния поверхности [5, 6]. В то же время, гауссовская модель позволяет выразить в замкнутой аналитической форме корреляционные функции (моменты) поля второго и высших порядков при отражениях от нескольких фазовых экранов, в т.ч. неоднократных. Это дает возможность исследования статистики спеклов, флуктуаций интенсивности, усреднения полей по апертурам антенных систем, в т.ч. синтезированным, и др.

Целью данной работы является разработка гибридной расчетной модели радиолокационных отражений от случайной шероховатой поверхности, сочетающей в себе достоверность экспоненциальной модели и вычислительную гибкость гауссовской. Предлагается аппроксимировать экспоненциальную корреляционную функцию суммой гауссовских слагаемых, допускающих выражение дифракционных интегралов в замкнутой аналитической форме.

В работе найдены соответствующие аппроксимации. Для построенных аппроксимаций рассчитаны радиолокационные сечения рассеяния поверхностей в форме, допускающей сравнение с ранее известными эталонными результатами. С помощью предложенных расчетных моделей исследована задача радиолокации рельефной поверхности локатором синтезированной апертуры (рис. 1).

Аппроксимируем корреляционную функцию высот поверхности $h(\rho)$ суммой M гауссовских слагаемых вида

$$C(\rho) = \exp\left(-\frac{\rho}{l}\right) \approx \sum_{m=1}^M b_m \exp\left(-\frac{\rho^2}{a_m^2 l^2}\right). \quad (1)$$

На рис. 2 показаны радиолокационные ЛЧМ отражения с синтезом апертуры. Хорошее совпадение между собой различных приближенных расчетов можно трактовать как их общую близость к некоторой предельной кривой, соответствующей искомому результату. Значения безразмерных расчетных параметров $k_0 l = 100$, $k_0 h = 1$, $k_0 z = 25000$, $\beta = 0.1$. Также можно проследить зависимость ширины интервала времен запаздывания, в пределах которого применяемый в данной работе подход обеспечивает удовлетворительную аппроксимацию, от количества слагаемых в сумме гауссовой аппроксимации экспоненциальной корреляционной функции. Результат позволяет выявить связь ширины этого интервала с обсуждаемым выше диапазоном углов рассеяния, пространственным спектром корреляционной функции рельефа и минимальным масштабом её аппроксимации суммой гауссовских слагаемых (1). Практически расширение диапазона корреляционных масштабов, в пределах которого действительны предложенные аппроксимации корреляционной функции высоты рельефа, однозначно связано с расширением диапазона углов обратного рассеяния, в пределах которого работоспособны полученные в работе выражения для интенсивностей отражения, и соответствующего диапазона времен запаздывания радиолокационного отражения. Для упрощения сравнительных оценок, в

т.ч. вклада рассеяния на рельефе в отраженный сигнал, пунктирной кривой показано отражение ЛЧМ сигнала от плоской поверхности, т.е. в отсутствии рассеяния на рельефе.

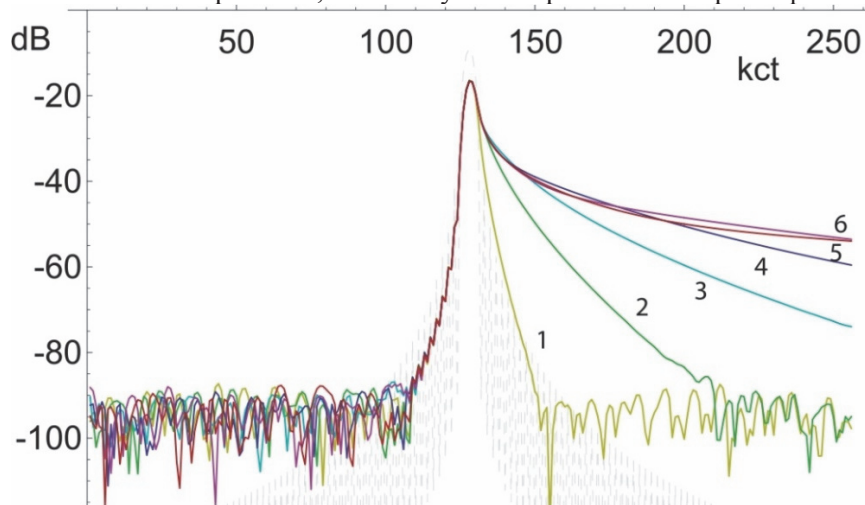


Рис. 2. Радиолокационные отражения ЛЧМ от случайного рельефа поверхности ($k_{0l} = 100$, $k_{0h} = 1$, $k_{0z} = 25000$, $\beta = 0.1$) при различных гауссовских аппроксимациях экспоненциальной корреляционной функции (указаны цифровыми метками при кривых). Пунктирная кривая – отражение от плоской поверхности

Заключение

Предложен подход к расчету отражающих свойств рельефной поверхности на основе аппроксимации корреляционной функции рельефа суммой гауссовских слагаемых. Для модели рельефной поверхности с экспоненциальной функцией корреляции высот проведены расчеты сечений рассеяния поверхности и радиолокационных отражений ЛЧМ сигналов на синтезированную апертуру. Предложенный подход может быть применен к поверхностям с другими корреляционными функциями высот и к другим прикладным задачам, в т.ч. к расчету корреляционных функций интенсивности отражений ограниченных пучков и так далее.

Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [7]. Исследование выполнено в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Список литературы

1. Beckmann, P., A. Spizzichino. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. – NY : Macmillan and Company, 1963.
2. Ogilvy, J.A. Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces. – Bristol : Adam Hilger, 1991.
3. Goodman J.W. Introduction to Fourier Optics. – 2nd edition. – MacGraw-Hill, 1996.
4. Hagfors T. Backscattering from an undulating surface with applications to radar returns from the Moon // Journal of Geophysical Research (1896–1977). – 1964. – Vol. 69. – No. 18. – P. 3779–3784.
5. Johnson Joel T., Warnick Karl F., Xu Peng. On the Geometrical Optics (Hagfors' Law) and Physical Optics Approximations for Scattering From Exponentially Correlated Surfaces // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2007. – Vol. 45. – No. 8. – P. 2619–2629.
6. Sultan-Salem Ahmed K., Tyler G. Leonard. Hagfors' law revisited // Journal of Geophysical Research: Planets. – 2006. – Vol. 111. – No. E6.
7. «Lomonosov»: Supercomputing at Moscow State University / V. Sadovnichy, A. Tikhonravov, VI Voevodin, V. Opanasenko // Contemporary High Performance Computing: From Petascale toward Exascale. – Chapman & Hall/CRC Computational Science. – Boca Raton, United States: Boca Raton, United States, 2013. – P. 283–307.