

УДК 537.877

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА СОСТАВНОМ ЦИЛИНДРЕ И УСЕЧЁННОМ КОНУСЕ

А. А. Афонин, В. А. Тимофеев

Ярославский государственный университет им. П.Г.Демидова,

150003, Ярославль, Советская 14

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2017 г., после доработки - 20 июля 2017 г.

Аннотация. В работе проведено сравнение и анализ результатов математического моделирования рассеяния электромагнитных волн на объектах, составленных из нескольких однородных цилиндров конечной длины и усечённых конусов, представляющих модель элементов лесного массива. Расчёты произведены на основе метода дискретных источников. Получены и проанализированы угловые зависимости рассеянного поля для различных углов падения излучения на объект, соотношений геометрических размеров частей рассеивателей и длины волны падающего излучения.

Ключевые слова: метод дискретных источников, диэлектрические рассеиватели, элементы лесного массива, цилиндры, усечённые конусы, рассеянное электромагнитное поле.

Abstract. The paper is devoted to simulation of the electromagnetic interaction with the forest environment. The modeling results of radiowave scattering by the finite length obstacles are represented. The objects of two shapes have been examined. The first of them was composed from homogeneous coaxial cylinders. The other obstacle was the truncated cone. These models can be used for simulation of the vegetation components. The numerical results have been obtained on the basis of the method of discrete sources for microwave frequencies. The scatterer parameters corresponded to complex permittivity of trees at this band. The angular dependencies of the scattered field have been studied. The effects of angle of incidence, different ratios of the geometric dimensions of the obstacles and wavelength have been carried out. The modeling results have been considered both for the case when the cylinder length was

larger of wavelength and for the case when the cylinder length was smaller of wavelength. It has been found that the behavior of the angular dependencies for the composite cylinder have been observed more complicate pattern. This is due to edge cylinders diffraction. Therefore, the simulation of the components of the forest environment by only homogeneous coaxial cylinders can lead to significant errors. The numerical calculations have been carried out by TITAN X GPU supported by NVIDIA Corporation.

Key words: radiowave scattering, homogeneous coaxial cylinders, truncated cone, vegetation, method of discrete sources.

1. Введение

Исследования и анализ взаимодействия ультракоротких радиоволн с различными видами рассеивателей актуальны для радиосвязи (мобильная, радиорелейная и т.д.), радиолокации, радионавигации, дистанционного зондирования земных покровов и геодезических задач, решаемых радиометодами. При этом существенный вклад в условия распространения радиоволн в приземном слое атмосферы вносят лесные массивы. Они представляют собой случайно неоднородную диэлектрическую среду, основными структурными элементами которой являются листва, иглы, ветви и стволы деревьев.

В различных подходах для решения данной задачи используют либо плоскостойкие регулярные модели леса [1-2], либо статистические модели рассеяния радиоволн, с использованием в последних геометрических характеристик отдельных рассеивателей различного вида [3-6]. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является накопление результатов численного моделирования, полученных для рассеивателей различной формы с разнообразными геометрическими соотношениями, для сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. При их соответствии можно будет активнее использовать этот метод статистического моделирования в практических приложениях.

Целью данной работы является исследование особенностей рассеяния на объектах, которые по форме наиболее адекватно описывают отдельные элементы деревьев (в зависимости от дифракционных параметров) и могут в дальнейшем быть использованы как компоненты для создания более сложных моделей лесной среды.

В работе рассматриваются угловые характеристики рассеяния объектов, составленных из соосных цилиндрических элементов и усечённых конусов. С помощью них могут быть образованы модели стволов деревьев и крупных веток. Для расчётов использовано значение комплексной диэлектрической проницаемости, характерное для растительности [7].

В качестве метода моделирования выбран метод дискретных источников (МДИ) [8,9]. С его помощью можно решать задачи дифракции плоской электромагнитной волны на рассеивателях различной формы с комплексной диэлектрической проницаемостью.

2. Расчёт взаимодействия плоской электромагнитной волны с осесимметричными рассеивателями методом дискретных источников

Реальные ветки и стволы деревьев имеют изменяющийся по длине диаметр и для их моделирования можно использовать либо несколько соосно составленных в длину цилиндров с разными диаметрами, либо усечённые конусы. Оба таких типа рассеивателей являются осесимметричными.

Пусть падающая волна имеет линейную поляризацию и распространяется в положительном направлении оси ОУ:

$$\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_x e^{-iky}, \quad E_x = E_0 e^{-iky}, \quad E_y = 0, \quad E_z = 0. \quad (1)$$

Задача описания взаимодействия электромагнитной волны с гомогенным диэлектрическим рассеивателем, ограниченным поверхностью S , является внешней краевой задачей для системы уравнений Максвелла.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = i\omega \epsilon \mathbf{E}, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -i\omega \mu \mathbf{H} \quad (2)$$

с граничными условиями на поверхности S рассеивателя

$$[\mathbf{n} \times \mathbf{E}] = 0, \quad (3)$$

где $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_s - \mathbf{E}_i$, $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_s - \mathbf{H}_i$, \mathbf{E}_0 , \mathbf{H}_0 , \mathbf{E}_i , \mathbf{H}_i и \mathbf{E}_s , \mathbf{H}_s – векторы напряженностей электрического и магнитного полей падающей, внутренней и рассеянной волн; ϵ и μ – электрическая и магнитная проницаемости среды; ω – круговая частота электромагнитных колебаний; \mathbf{n} – вектор внешней нормали к поверхности тела.

Диполи, образующие дипольный момент в точках размещения дискретных источников M_n , разложены на две взаимно перпендикулярные составляющие в плоскости, касательной к поверхностям вспомогательного усеченного конуса. На боковой поверхности одна из составляющих ориентирована вдоль образующей, вторая – по касательной. На торцевых поверхностях усеченного конуса одна из составляющих ориентирована вдоль радиуса, вторая – перпендикулярно первой в плоскости торцевой поверхности.

При решении данной задачи необходимо вычисление величины этих диполей. Рассеянное поле представляется суммой полей диполей, размещенных на вспомогательной поверхности.

Поля дискретных источников, находящиеся на вспомогательной поверхности, должны удовлетворять системе Максвелла, условию излучения и образовывать полную замкнутую функциональную систему на поверхности препятствия [8].

Существует множество схем размещения дискретных источников для удовлетворения требований, перечисленных выше. В данной работе вспомогательная поверхность S_0 (рис.1), служащая для размещения дискретных источников, получается масштабным уменьшением поверхности рассеивателя с некоторым коэффициентом K_m . Этот коэффициент подбирается динамически в ходе проверки невязки. Обычно его значения лежат в диапазоне 0,6-0,9. При этом невязка не превышала 5%.

Доказательство полноты и замкнутости построения системы для такого расположения дискретных источников в случае диэлектрических (проницаемых) рассеивателей с характеристиками материала $Im \epsilon_s \leq 0$, $Im \mu_s \leq 0$, обеспечивающих единственность решения, дано в [9].

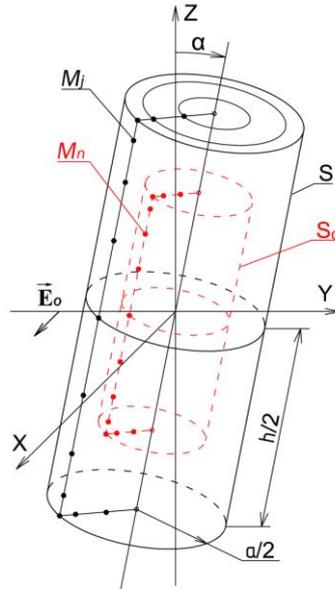


Рис. 1. Геометрия задачи.

Рассеянное поле в дальней зоне можно представить в виде суммы полей производимых электрическими диполями, размещенными в точках $M_n(x_n, y_n, z_n)$ внутри рассеивателя на вспомогательной поверхности S_0 .

$$\mathbf{E}_s = \sum_{n=1}^N \frac{i\omega}{k^2} \text{rot rot} \Pi_n^e,$$

$$\mathbf{H}_s = \sum_{n=1}^N \frac{1}{\mu} \text{rot} \Pi_n^e,$$

$$\Pi_n^e = \Psi(M, M_n) \mathbf{P}^n = \Psi(M, M_n) [P_{\tau 1}^n \mathbf{e}_{\tau 1}^n + P_{\tau 2}^n \mathbf{e}_{\tau 2}^n],$$

где $\Psi(M, M_n) = \exp(ikR_{MMn})/R_{MMn}$ – решение уравнения Гельмгольца; Π_n^e – электрический вектор Герца; N – число диполей на поверхности S_0 ; k – волновое число; R_{MMn} – расстояние от диполя с номером n до точки наблюдения $M(x, y, z)$; \mathbf{P}^n – неизвестные векторные дипольные моменты.

3. Результаты моделирования

На основе данной математической модели были выполнены численные расчеты угловых характеристик рассеянного поля в зависимости от угла наклона рассеивателя к направлению распространения падающего поля, геометрических параметров частиц и длины волны падающего излучения.

При моделировании были проанализированы зависимости скорости вычислений задачи и значения невязки от количества дискретных источников и точек коллокации, а также от схемы их расположения. Были опробованы как равномерная, так и неравномерная сетки. В результате анализа было выбрано неравномерное распределение дискретных источников по боковой поверхности цилиндра с увеличением концентрации точек вблизи торцов [10]. В работе [11] было представлено сравнение результатов численного моделирования рассеяния для составных цилиндрических объектов и гладких цилиндров. Модель предполагала минимизацию возможных геометрических форм при анализе сложных объектов лесного массива – использование только цилиндров. Было показано сильное влияние выбора шага диаметров цилиндров, составляющих рассеиватель, на результаты.

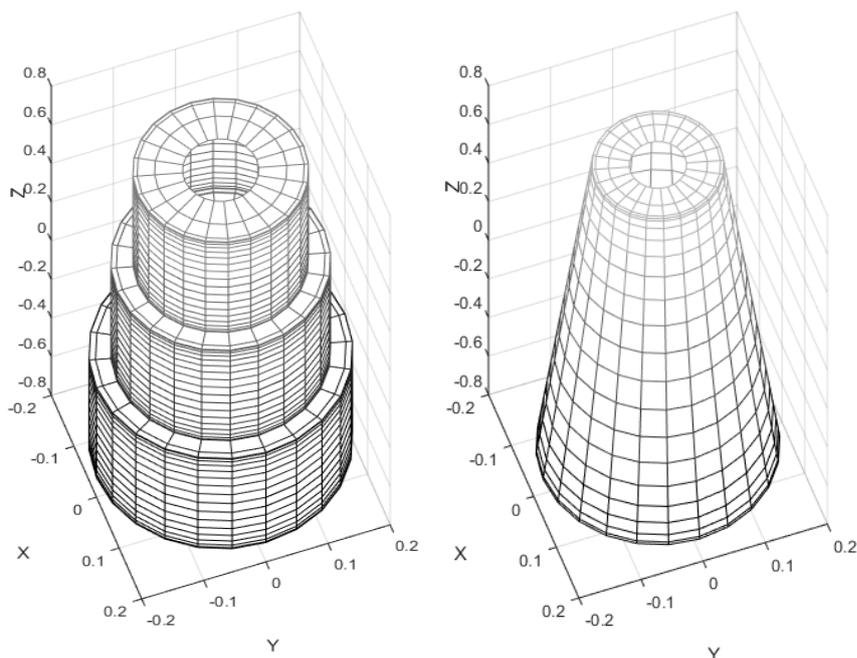


Рис. 2. Вид моделируемых рассеивателей.

В качестве рассеивателей для анализа в данной работе были выбраны составные объекты из трёх однородных цилиндров и усечённые конусы (см. геометрию на рис. 2) с одинаковой комплексной диэлектрической проницаемостью, соответствующей живой древесине ($\epsilon = 28,04 - i 13,34$, длина

волны $\lambda=31\text{см}$). Цилиндры составлены по одной оси, причём центр масс среднего цилиндра совпадает с нулём оси координат.

Для сравнения результатов на рис. 3-8 зависимости слева соответствуют случаю рассеивателя, составленного из цилиндров, а справа – усечённому конусу. В верхней части рисунков представлен трёхмерный вид нормированных на максимум угловых зависимостей амплитуды рассеянного электрического поля. В нижней части рисунков сечения соответствующих зависимостей в плоскости XY обозначены сплошной линией, в плоскости YZ – пунктирной линией. Представленные результаты получены при $h/\lambda=0,4$ и $h/\lambda=2$.

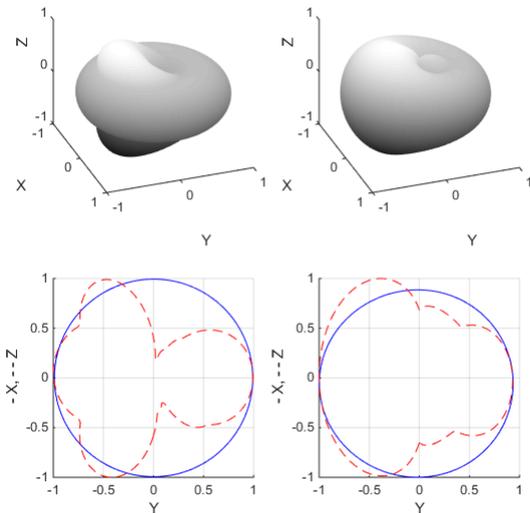


Рис. 3. Нормированные угловые зависимости рассеянного поля при $\lambda>h$. Отношение верхнего диаметра к нижнему 0,95.

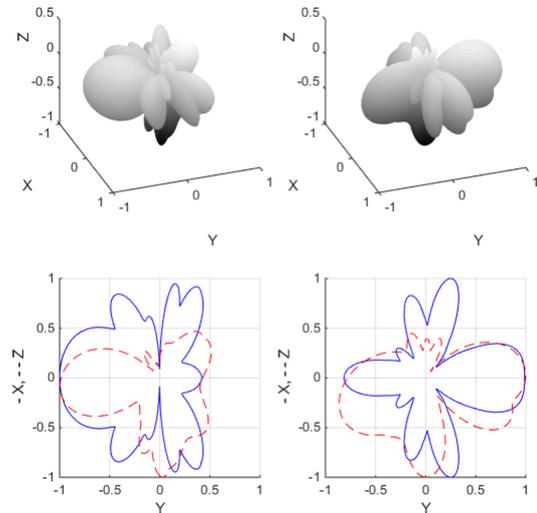


Рис. 4. Нормированные угловые зависимости рассеянного поля при $\lambda<h$. Отношение верхнего диаметра к нижнему 0,8.

На рис. 3 был выбран малый шаг изменения диаметров. При этом наблюдается более выраженная асимметричность для рассеянного поля объекта, составленного из цилиндров с уменьшающимися диаметрами от нижнего к верхнему, по сравнению с моделью усечённого конуса при длине рассеивателя меньше длины волны. Более сложная картина наблюдается при

длине волны меньше размеров рассеивателя, что видно на рис. 4. При этом наблюдается большее количество лепестков для рассеивателя из цилиндров.

Основная проблема может возникнуть, если цилиндрический объект будет располагаться под углом к направлению падающего поля, поэтому были выполнены расчеты при наклоне рассеивателя.

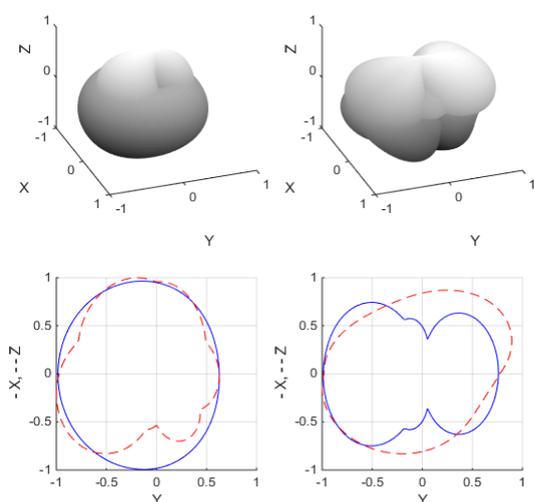


Рис. 5. Нормированные угловые зависимости рассеянного поля при $\lambda > h$. Отношение верхнего диаметра к нижнему 0,8. Угол наклона $(+ \pi/6)$.

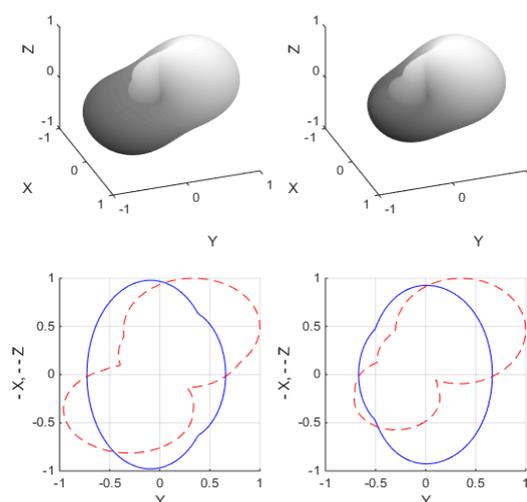


Рис. 6. Нормированные угловые зависимости рассеянного поля при $\lambda > h$. Отношение верхнего диаметра к нижнему 0,95. Угол наклона $(+ \pi/6)$.

На рис. 5 видно большее количество лепестков на сечении, обусловленном наклоном при рассеянии от набора цилиндров, по сравнению с усечённым конусом. При этом наблюдается более выраженная асимметричность для рассеянного поля объекта, составленного из цилиндров по сравнению с моделью усечённого конуса при длине рассеивателя меньше длины волны.

При сравнении рис. 5 и рис. 6 видно, что на последнем из них сечения YZ, обусловленные наклоном объектов становятся всё более схожими. При этом минимумы сечения по YX наблюдаются для разных углов, что может быть обусловлено различным вкладом образующих цилиндров и конусов, расположенных под разными углами к направлению падающего поля.

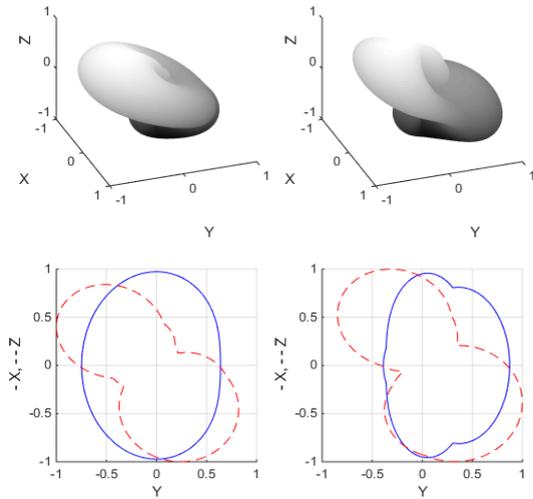


Рис. 7. Нормированные угловые зависимости рассеянного поля при $\lambda > h$. Отношение верхнего диаметра к нижнему 0,95. Угол наклона $(-\pi/6)$.

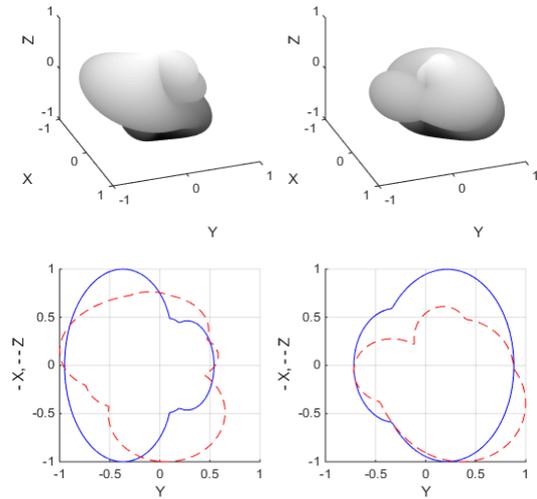


Рис. 8. Нормированные угловые зависимости рассеянного поля при $\lambda > h$. Отношение верхнего диаметра к нижнему 0,8. Угол наклона $(-\pi/6)$.

При анализе сечений, обусловленных наклоном рассеивателя (YZ) на рис. 7 и рис. 8, видно изменение углов направлений рассеяния в соответствии с изменением направления падающего поля.

Характерной особенностью при сравнении рис. 6 и рис. 8, которые отличаются только углом поворота рассеивателя относительно падающего поля, является появление на последнем большего количества лепестков диаграммы рассеяния для объекта, составленного из цилиндров. Это говорит о большом вкладе кромок и торцевых плоскостей в формирование картины рассеяния.

Далее рассмотрим зависимость рассеянного поля составных цилиндров (сплошная линия) и усеченного конуса (пунктирная линия) от отношения диаметров верхнего и нижнего оснований.

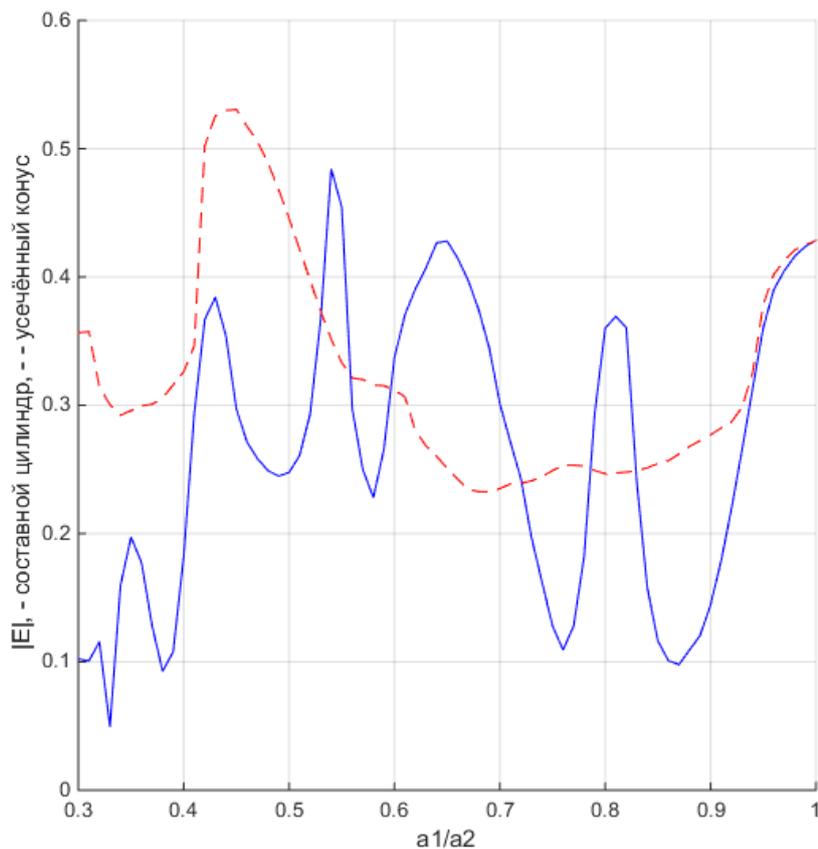


Рис. 9. Зависимость рассеянного поля составных цилиндров (сплошная линия) и усеченного конуса (пунктирная линия) от отношения диаметров верхнего и нижнего оснований при $h/\lambda = 2$, $\alpha = +\pi/4$, угол наблюдения $\theta = +\pi/6$.

На рис.9 заметно, что для составных цилиндров график более осциллирующий, чем для усечённых конусов. При отношении диаметров равном единице амплитуды рассеяния совпадают.

Существенные отличия амплитуды рассеянного поля (более 10%) наблюдаются при отношении диаметров менее 0,92.

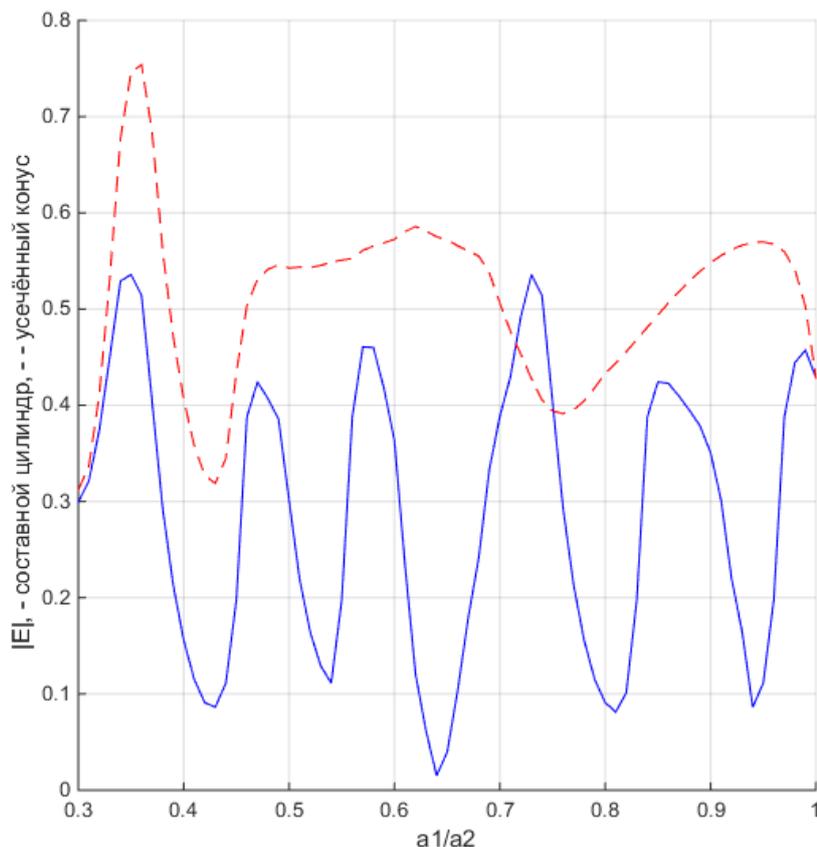


Рис. 10. Зависимость рассеянного поля составных цилиндров (сплошная линия) и усечённого конуса (пунктирная линия) от отношения диаметров верхнего и нижнего оснований при $\alpha = -\pi/4$, угол наблюдения $\theta = +\pi/6$.

На рис. 10 снова вид графика для составных цилиндров более осциллирующий, чем для усечённых конусов. Причём в данном случае перепады между минимумами и максимумами более выражены, что можно объяснить направлением падающего поля на плоскости ступеней составного цилиндра. Существенные отличия амплитуды рассеянного поля (более 10%) наблюдаются уже при отношении диаметров менее 0,98.

Перейдём к рассмотрению более длинных рассеивателей. На рис. 11-12 для расчётов принято отношение $h/\lambda = 10$.

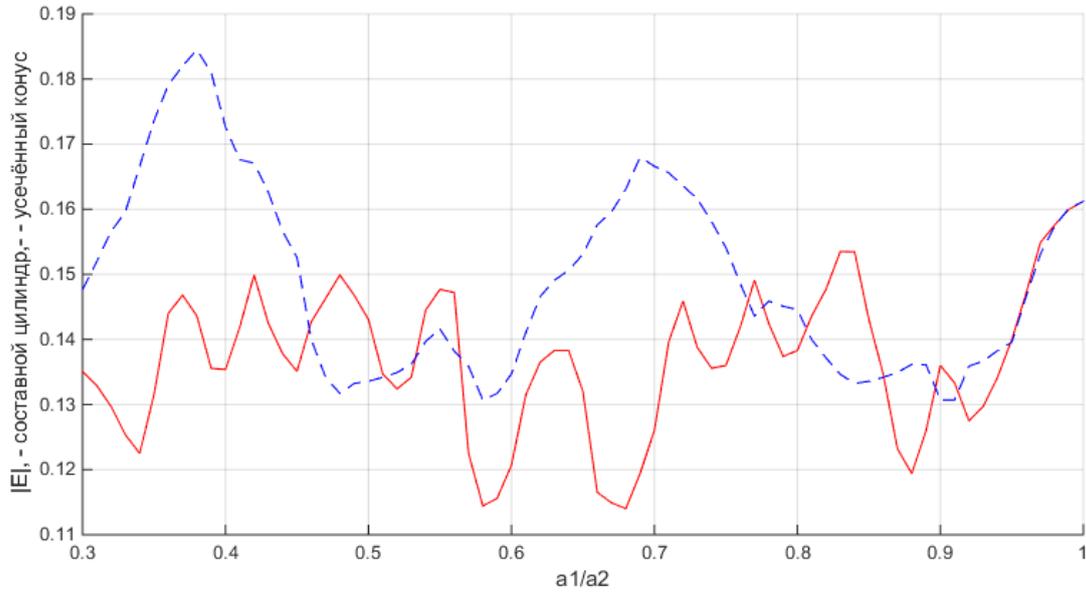


Рис. 11. Зависимость рассеянного поля составных цилиндров (сплошная линия) и усеченного конуса (пунктирная линия) от отношения диаметров верхнего и нижнего оснований при $h/\lambda = 10$, $\alpha = +\pi/4$, угол наблюдения $\theta = +\pi/6$.

Существенные отличия амплитуды рассеянного поля (более 10%) наблюдаются при меньшем отношении диаметров (0,89), чем для более коротких рассеивателей. Также можно обратить внимание, что разброс в осцилляциях наблюдается уже начиная с отношения равного 0,98. При отношении большем 0,95 наблюдается практически полное совпадение графиков.

При обратном угле падения волны (рис. 12) существенные отличия амплитуды рассеянного поля (более 10%) наблюдаются при отношении диаметров 0,91. При этом разнонаправленные осцилляции наблюдаются уже при отношении равном 0,97. Практически полное совпадение графиков наблюдается только при отношении большем 0,98. Таким образом, даже для длинных цилиндров падение на выступающие ступени оказывает существенный вклад в картину рассеяния.

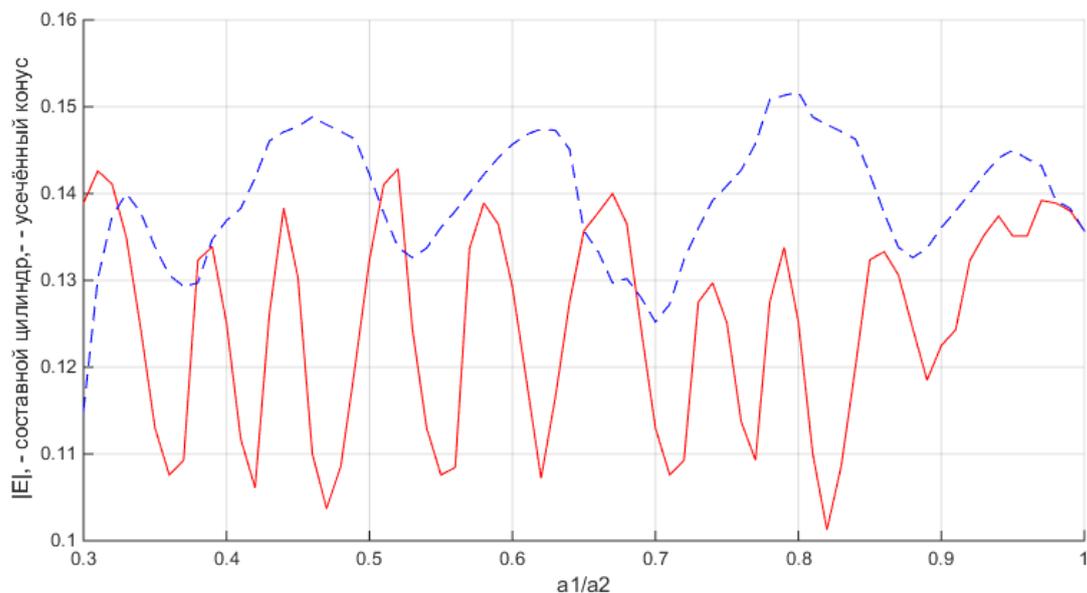


Рис. 12. Зависимость рассеянного поля составных цилиндров (сплошная линия) и усеченного конуса (пунктирная линия) от отношения диаметров верхнего и нижнего оснований при $h/\lambda = 10$, $\alpha = -\pi/4$, угол наблюдения $\theta = +\pi/6$.

4. Заключение

В работе на основе метода дискретных источников с помощью компьютерного моделирования проведено сравнение и анализ результатов математического моделирования рассеяния электромагнитных волн на объектах, составленных из нескольких однородных цилиндров конечной длины и усечённых конусов. Приведены зависимости характеристик рассеяния при различных соотношениях геометрических параметров рассеивателей и длины падающей волны, а также угла наклона объектов к направлению падающего поля. Были получены трехмерные зависимости и сечения, позволяющие наглядно представить рассеянное поле.

Данная работа носит исследовательский характер и является подготовкой к вычислению рассеяния на моделях реальных деревьев, проверкой составных частей этих моделей. Без такого исследования особенностей отдельных элементов невозможно сделать осознанный выбор наиболее подходящих форм для них, и двигаться к моделям рассеивателей, имеющих более сложную структуру.

На основании полученных зависимостей можно сделать вывод, что моделирование растительной среды только унифицированными цилиндрами различных геометрических размеров может приводить к дополнительным погрешностям, обусловленным появлением рассеяния на кромках и торцах в местах стыковки элементов. Таким образом, можно рекомендовать модель усечённого конуса, лишённую этого недостатка.

Для ускорения вычислений использован GPU TITAN X, который был подарен NVIDIA Corporation.

Результаты представленной работы были обсуждены на заседании IV Всероссийской микроволновой конференции, проходившей 23-25 ноября 2016г. в ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН (г. Москва).

Литература

1. Доржиев Б.Ч., Плетнев В.И., Хомяк Е.М. Погонное ослабление метровых волн, распространяющихся в лесной среде. Распространение электромагнитных волн: сб. статей. – Улан-Удэ, 1987, С.87-103.
2. Багдасарян Е.А., Тимофеев В.А. Анализ напряженности электромагнитного поля, образованного двухлучевым механизмом распространения волны, за пологом растительного слоя. Телекоммуникации. 2006, №1, 35-39.
3. Чухланцев А.А., Шутко А.М., Головачев С.П. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами. Радиотехника и электроника, 2003, т.48, №11, с. 1285-1311.
4. Ulaby F.T., Sarabandi K., McDohald K., et al. Michigan microwave canopy scattering model. / Int. J. Remote Sensing, 1990, v.11, No 7, pp. 1223-1253.
5. Чухланцев А.А. СВЧ радиометрия растительных покровов. Дисс. на соискание ученой степени д.ф.-м.н, М. 2004.
6. Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами, пер. с англ., М., 1961.
7. Ulaby F.T., El-Rayes M.A. Microwave dielectric spectrum of vegetation – Part II: Dual dispersion model / IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. GE-25, No. 5, pp. 550-557, Sept. 1987.

8. Ерёмин Ю.А., Свешников А.Г. Метод дискретных источников в задачах рассеяния электромагнитных волн. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2003. № 10. с. 3.
9. Ерёмин Ю.А., Свешников А.Г. Анализ методом дискретных источников дифракции электромагнитных волн на трехмерных рассеивателях. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 1999. Т.39. № 12. С.2050–2063.
10. Афонин А.А., Тимофеев В.А. Моделирование рассеяния радиоволн на цилиндрических объектах методом дискретных источников. Труды XX международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь". Воронеж. 2014. Т.1. С.395-402.
11. Афонин А.А., Тимофеев В.А. Моделирование угловых характеристик рассеяния радиоволн на составных цилиндрических объектах. Труды XXII Международной научно-технической конференции "Радиолокация, навигация, связь". Воронеж. 2016. Т.2. С.715-722.

Ссылка на статью:

А. А. Афонин, В. А. Тимофеев. Анализ численного моделирования рассеяния радиоволн на составном цилиндре и усечённом конусе. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2017. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/1/text.pdf>