

УДК 537.877

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ РАССЕЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

А. А. Афонин, В. А. Тимофеев

Ярославский государственный университет им. П.Г.Демидова,
150003, Ярославль, ул. Советская, 14

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2019 г., после доработки – 3 июня 2019 г.

Аннотация. В работе представлены результаты численного моделирования поляризационных характеристик рассеяния электромагнитных волн на объектах в виде усечённых конусов с плоскими и закруглёнными основаниями в качестве модели элементов лесного массива. Выполнен анализ угловых зависимостей сополярной и кроссполярной составляющих для различной ориентации рассеивателя и направления падения излучения, соотношений геометрических размеров частиц и длины волны. Проведено сопоставление с рассеянием на круговом цилиндре. Моделирование выполнено на основе метода дискретных источников.

Ключевые слова: рассеяние радиоволн, поляризация, растительность, однородный усечённый конус, однородный усечённый конус с закруглёнными основаниями, метод дискретных источников.

Abstract. The paper is devoted to simulation of the electromagnetic interaction with the forest environment. The modeling results of radio-wave scattering by the finite length obstacles were represented. The truncated cones of two shapes have been examined. The first of them was flat-based cone. The other cone has the rounded base. 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 were corresponded to complex permittivity of trees at this band. The angular dependencies of the polarization properties 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. It has been found that the angular dependencies for co-polar and cross-polar components of the scattered field of the both truncated cones have been observed different behaviors. The cross-polar scattering field has revealed more complicate pattern.

The TITAN X GPU used for the numerical calculations this research was donated by the NVIDIA Corporation.

Key words: radio-wave scattering, polarization, vegetation, homogeneous truncated cone, homogeneous truncated cone with rounded bases, method of discrete sources.

1. Введение

Моделирование взаимодействия ультракоротких радиоволн с различными видами рассеивателей актуальны для многих практических приложений в радиолокации, навигации и связи. При этом существенный вклад в условия распространения радиоволн в приземном слое атмосферы дают лесные массивы. Они представляют собой случайно неоднородную диэлектрическую среду, состоящую из листвы, игл, ветвей и стволов деревьев и в общем случае взаимодействие излучения с такими средами носит достаточно сложный характер.

Для решения данной задачи на практике используют плоскостойкие регулярные модели леса [1, 2], однако на частотах выше 1 ГГц они становятся неприменимыми, т.к. характерные размеры элементарных рассеивателей для рассматриваемого диапазона становятся соизмеримыми с длиной волны излучения и в этом случае существенное влияние начинают оказывать эффекты объемного рассеяния [3]. Для их оценки необходима информация о взаимодействии излучения с отдельным элементом растительности. Решение подобных вопросов возможно только на основе численных методов.

Целью данной работы является исследование особенностей поляризационных составляющих 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 представлены результаты анализа угловых характеристик поляризационных компонент рассеянного поля для различных углов наблюдения и углов падения излучения на объекты, составляющие модели стволов деревьев и крупных веток. В качестве таких моделей рассмотрены усечённые конусы с плоскими и закруглёнными основаниями. Численные расчеты выполнены на основе метода дискретных источников (МДИ) [4, 5].

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

Реальные ветки и стволы деревьев имеют изменяющийся по длине диаметр и для анализа их рассеивающих свойств можно использовать различные модели. Наиболее адекватной формой как отдельного элемента такой среды является усечённый конус [6, 7]. Совокупность таких объектов с различными размерами и ориентацией в пространстве совместно с тонкими дисками или иглами для листвы и хвои может рассматриваться в качестве модели дерева. В данной работе для исследования использованы две формы рассеивателей: обычный усечённый конус и усечённый конус с закруглёнными основаниями. Они представлены на рис. 1.

В МДИ поля дискретных источников, находящихся на вспомогательной поверхности, должны удовлетворять системе Максвелла, условию излучения и образовывать полную замкнутую функциональную систему на поверхности препятствия. В работе [4] приведено доказательство разрешимости такой задачи при размещении источников внутри рассеивателя при диэлектрической проницаемости с отрицательной мнимой частью. Геометрия задачи представлена на рис. 2. Пусть падающая волна имеет линейную поляризацию и распространяется в положительном направлении оси OY . Середина оси усечённого конуса совпадает с нулём оси координат.

Существует множество схем размещения дискретных источников для удовлетворения требований, перечисленных выше. В данной работе, как и в [6, 7], вспомогательная поверхность S_0 , служащая для размещения дискретных источников, выбиралась масштабным уменьшением поверхности рассеивателя

с некоторым коэффициентом K_m . Этот коэффициент подбирался динамически в ходе проверки невязки. Обычно его значения лежали в диапазоне 0,6-0,97. При этом невязка не превышала 5%.

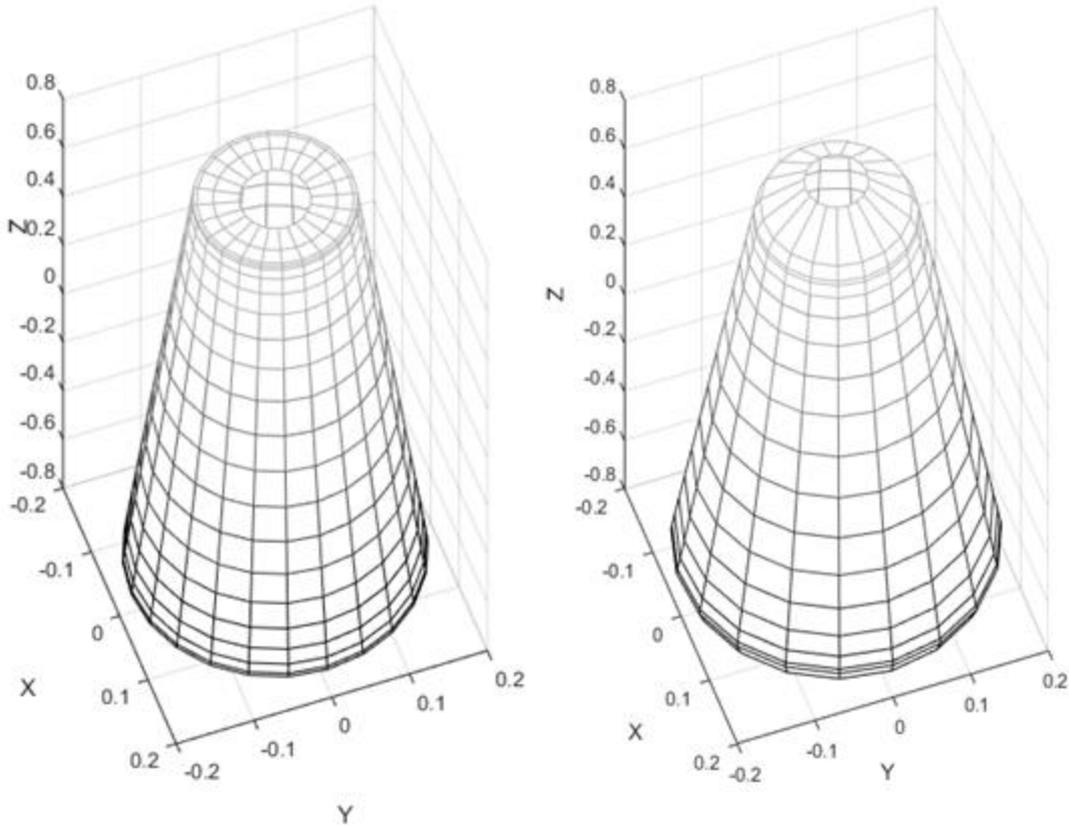


Рис. 1. Вид моделируемых рассеивателей.

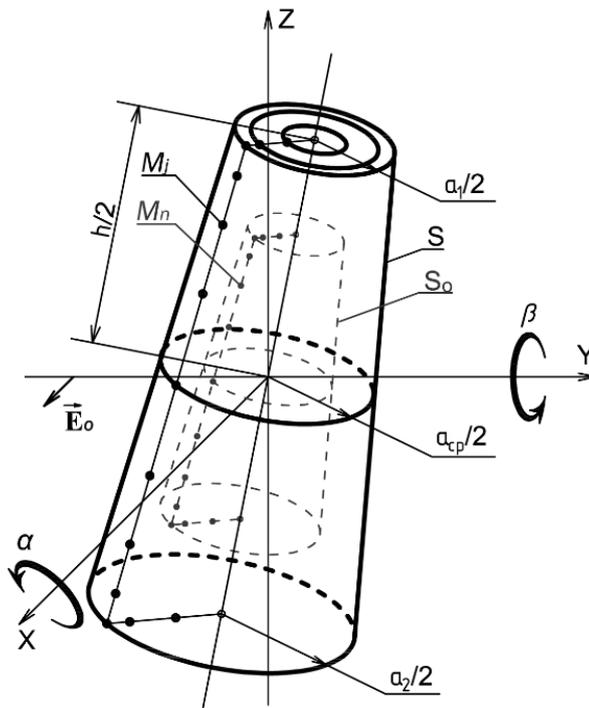


Рис. 2. Геометрия задачи.

В ходе предыдущих этапов моделирования были проанализированы зависимости скорости вычислений задачи и значения невязки от количества дискретных источников и точек коллокации, а также от схемы их расположения на вспомогательной поверхности S_0 . Выбрано неравномерное распределение с увеличением концентрации точек вблизи кромок [6, 7].

3. Результаты моделирования

Применяя данную математическую модель, были выполнены численные расчеты угловых характеристик рассеянного поля в зависимости от угла наклона рассеивателя к направлению распространения падающего поля, геометрических и электрических параметров рассеивателей и длины волны падающего излучения. Вычисления были проведены для двух значений длины волны падающего излучения. Значения комплексной диэлектрической проницаемости для каждой из них соответствовали данным для живой древесины [8, 9].

На рис. 3 и 4 представлены результаты расчетов дифференциального сечения рассеяния усечённого конуса с плоскими основаниями, геометрические размеры которого больше длины волны. В столбцах А и Д представлены трёхмерные графики сополярной и кроссполярной составляющих соответственно. В столбце В – сечения для сополярной составляющей. В столбце С – сечения для кроссполярной составляющей. На рис. 3 зафиксирован угол наклона усечённого конуса α . Сверху вниз в каждой строке меняется угол наклона β . На рис. 4 зафиксирован угол наклона усечённого конуса β . Сверху вниз в каждой строке меняется угол наклона α .

Как следует из приведенных зависимостей, наблюдается сильная изрезанность графиков. Это может быть следствием вклада рассеяния на границах сопряжения торцов усечённого конуса и его образующих. Характерны симметричные кроссполярные составляющие в сечении YZ при $\alpha = 0$, $\beta = 0$ и $\beta = +\pi/2$. Относительно малая асимметрия в графиках для сополярной составляющей при тех же углах обусловлена небольшим отношением

диаметров верхнего и нижнего оснований конуса. В случае отсутствия нулевого угла наклона β (рис. 4) симметрия не наблюдается.

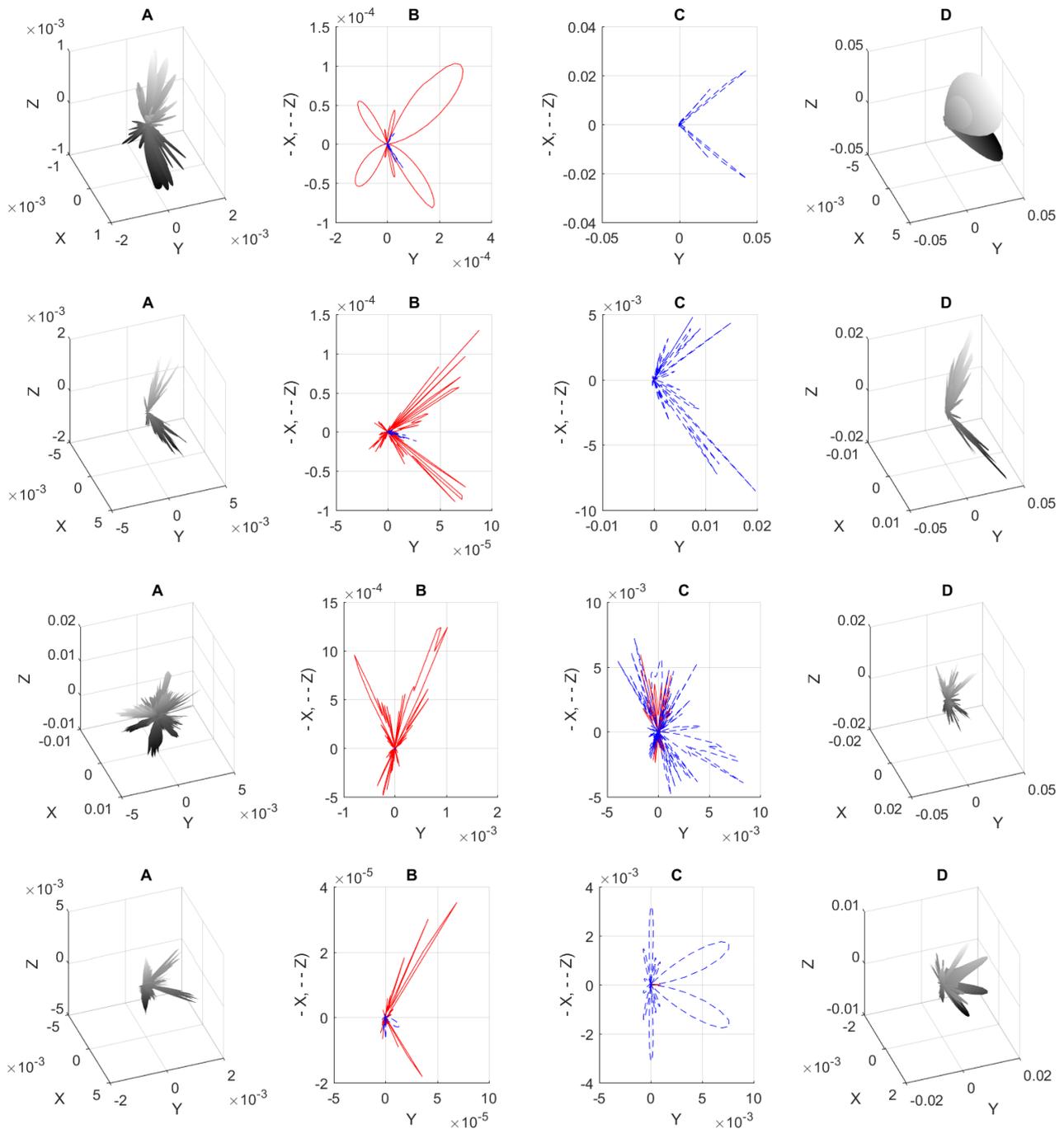


Рис. 3. Дифференциальное сечение рассеяния усечённого конуса.

При $\varepsilon = 28,04 - i 13,34$, $a_{cp}/\lambda=2$, $h/\lambda=100$.

Наклон конуса: $\alpha = 0$, $\beta = 0$, $\beta = +\pi/6$, $\beta = +\pi/3$, $\beta = +\pi/2$ (сверху вниз).

A – 3D сополярные компоненты, B – сечения сополярных компонент, C – сечения кроссполярных компонент, D – 3D кроссполярные компоненты.

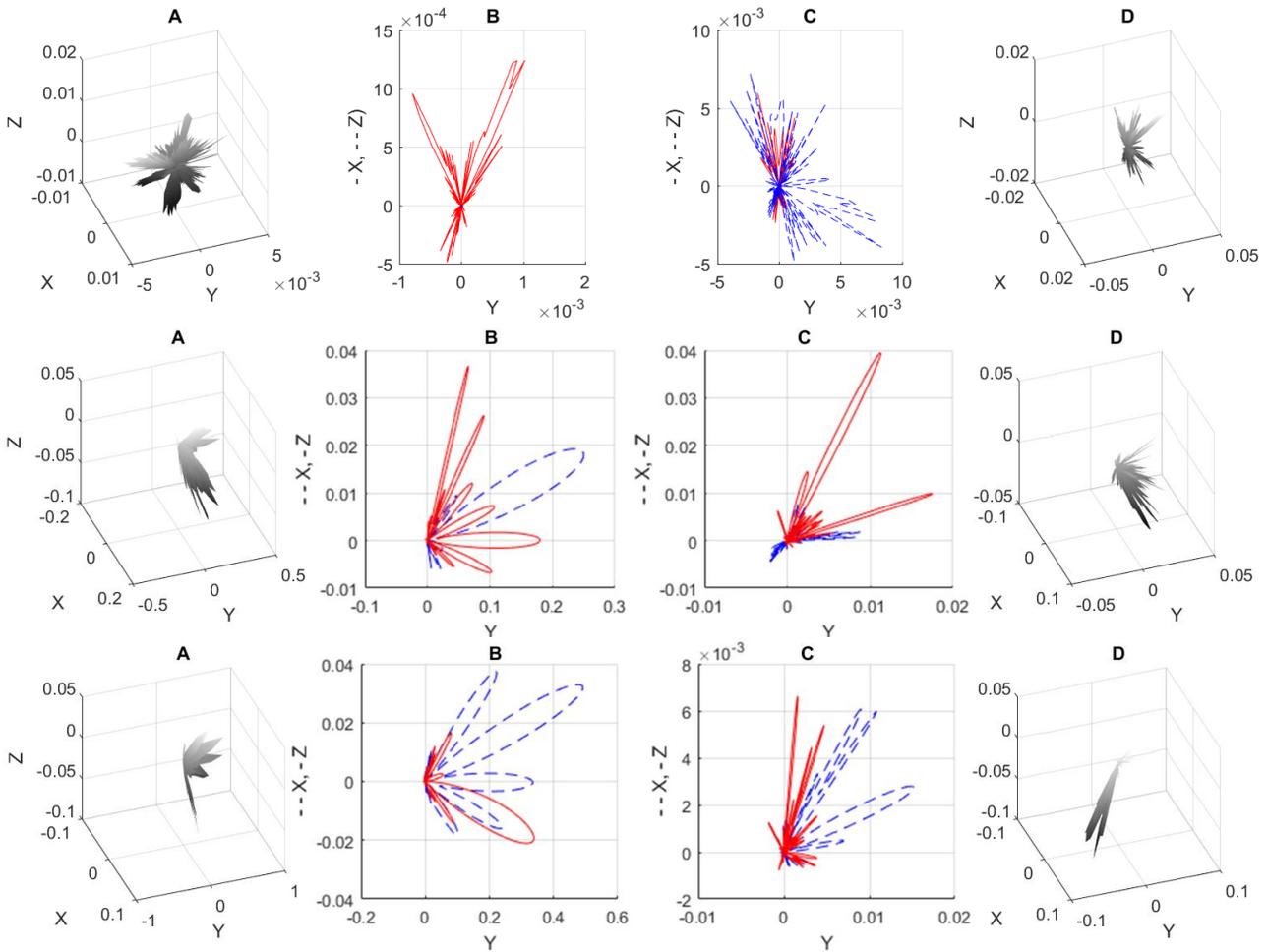


Рис. 4. Дифференциальное сечение рассеяния усечённого конуса.

При $\varepsilon = 28,04 - i 13,34$, $a_{cp} / \lambda = 2$, $h/\lambda = 100$.

Наклон конуса: $\beta = +\pi/3$, $\alpha = 0$, $\alpha = +\pi/6$, $\alpha = +\pi/3$ (сверху вниз).

A – 3D сополярные компоненты, B – сечения сополярных компонент, C – сечения кроссполярных компонент, D – 3D кроссполярные компоненты.

На рис. 5 представлены графики дифференциального сечения рассеяния усечённого конуса с закруглёнными основаниями, геометрические размеры которого больше длины волны. В столбцах A и D представлены трёхмерные графики сополярной и кроссполярной составляющих соответственно. В столбце B – сечения для сополярной составляющей. В столбце C – сечения для кроссполярной составляющей. Зафиксирован угол наклона усечённого конуса α . Сверху вниз в каждой строке меняется угол наклона β .

Как для результатов, приведенных на рис. 3, наблюдается сильная изрезанность графиков, но с несколько меньшим разбросом уровней лепестков. Что подтверждает вклад в это явление границы сопряжения торцов усечённого

конуса и его образующих, которые для закруглённых оснований не образуют такого же резкого перехода, как для плоских. Характерны симметричные кроссполярные составляющие в сечении YZ при $\alpha = 0$, $\beta = 0$ и $\beta = +\pi/2$. При этом, также как и в случае усечённого конуса с плоскими основаниями, имеет место асимметрия в графиках сополярных составляющих при тех же углах.

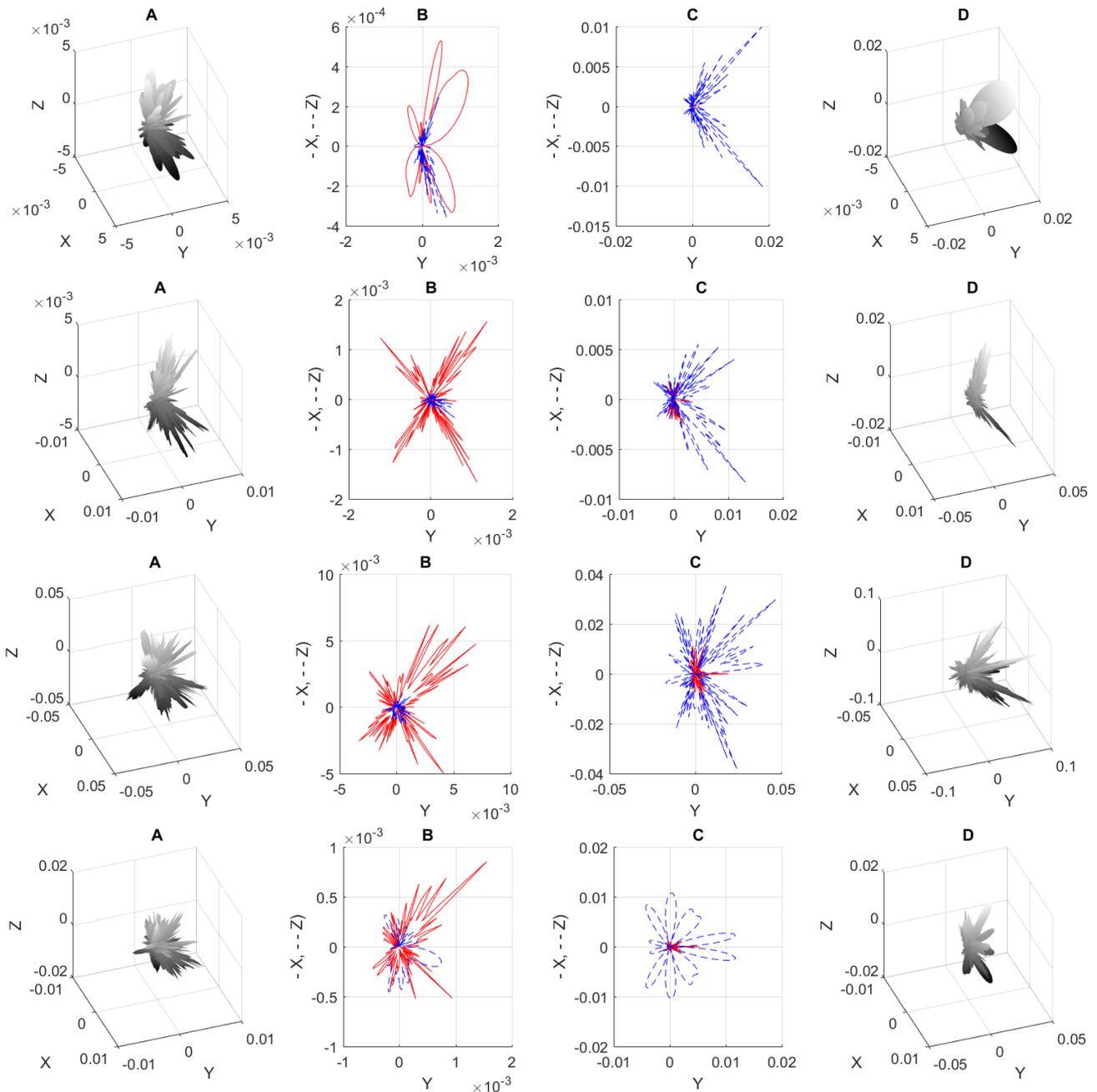


Рис. 5. Дифференциальное сечение рассеяния усечённого конуса с закруглёнными основаниями. При $\varepsilon = 28,04 - i 13,34$, $a_{cp}/\lambda=4$, $h/\lambda=100$. Наклон конуса: $\alpha = 0$, $\beta = 0$, $\beta = +\pi/6$, $\beta = +\pi/3$, $\beta = +\pi/2$ (сверху вниз). А – 3D сополярные компоненты, В – сечения сополярных компонент, С – сечения кроссполярных компонент, D – 3D кроссполярные компоненты.

На рис. 6 – рис. 9 представлены примеры поведения составляющих рассеянного поля для усечённого конуса (сополярная компонента – сплошная линия, кроссполярная компонента – пунктирная линия) при изменении соотношения диаметров оснований для угла падения поля $+\pi/4$. Для сравнения точечной линией показан уровень рассеянного поля для цилиндра с диаметром равным среднему диаметру верхнего и нижнего оснований a_{cp} .

На первых двух рисунках данной серии представлены результаты расчётов для рассеивателей с $\varepsilon = 28,04 - i 13,34$ и длины волны $\lambda = 3,1\text{см}$ из [8].

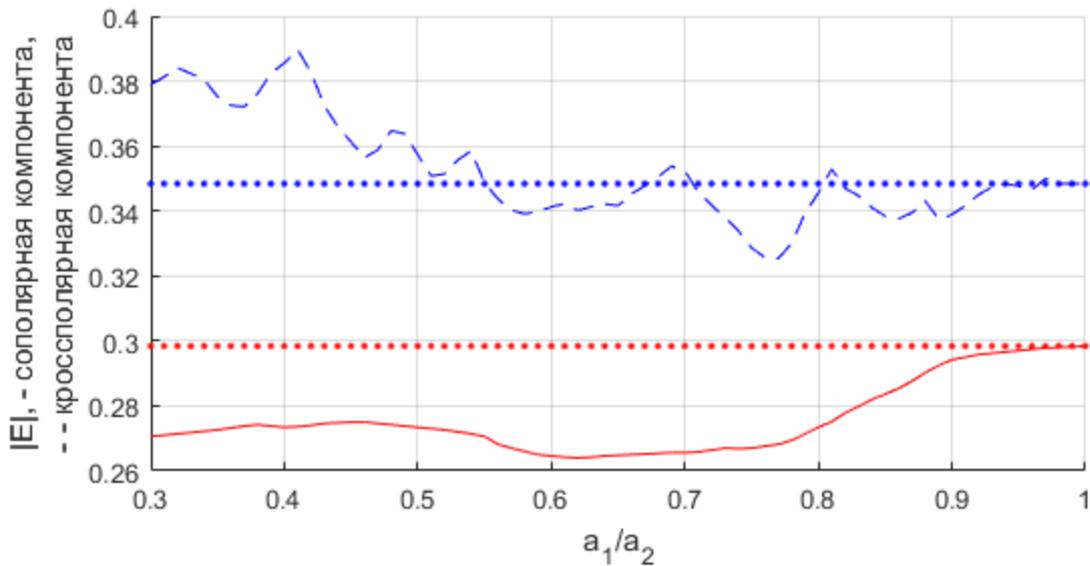


Рис. 6. Зависимость сополярной и кроссполярной составляющих рассеянного поля от отношения диаметров верхнего и нижнего оснований. При $\varepsilon = 28,04 - i 13,34$, $\lambda=3,1\text{см}$. Угол наблюдения $\theta = +\pi/6$.

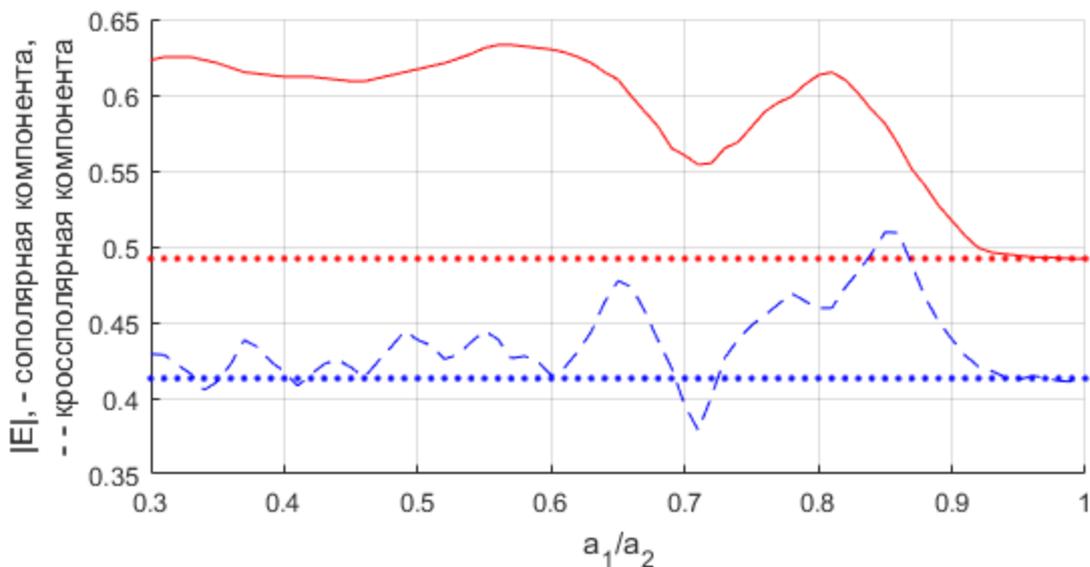


Рис. 7. Зависимость сополярной и кроссполярной составляющих рассеянного поля от отношения диаметров верхнего и нижнего оснований.

При $\varepsilon = 28,04 - i 13,34$, $\lambda = 3,1$ см. Угол наблюдения $\theta = -\pi/6$.

Видно существенное различие характера изменения амплитуды рассеяния для сополярной и кроссполярной составляющих. Первая из них демонстрирует плавные изменения при уменьшении отношения диаметров оснований рассеивателя. На второй видны характерные резкие вариации амплитуды. Причём эти колебания начинаются даже при малых отклонениях отношения диаметров оснований от единицы. При этом интервал, для которого отклонения амплитуды рассеянного поля для усечённого конуса не превышают 10% от соответствующих значений для цилиндра (отношение диаметров равно 1), для кроссполярной составляющей даже больше, чем у сополярной.

При сравнении поведения сополярных составляющих видно, что при отклонении отношений диаметров от единицы для разных углов наблюдения θ графики кривых рассеяния для усечённого конуса уходят от значений для цилиндра в разные стороны, что можно объяснить вкладом в рассеяние торцов разной площади и различным положением образующих объект относительно направления падающего поля. Причём можно заметить некоторую периодичность изменения амплитуды рассеяния для сополярной составляющей.

На следующих двух рисунках представлены результаты расчётов для рассеивателей с $\varepsilon = 20,12 - i 2,38$, длина волны $\lambda = 12,24$ см [9]. Для сопоставимости результатов размеры рассеивателей увеличены пропорционально изменению длины волны.

Для данных объектов наблюдается периодичность минимумов и максимумов для кроссполярной составляющих амплитуды рассеянного поля. Таким образом, наблюдаемая для двух типов частиц периодичность не является стабильной характеристикой одной из компонент. В обоих случаях видны небольшие колебания кроссполярных компонент свыше значения 0,96 отношения диаметров, что не наблюдается для сополярной компоненты. При этом амплитуда этих колебаний не превышает 3% от уровня рассеяния для цилиндрической частицы, т.е. меньше заданной невязки (5%) и потому не может быть проанализирована с достаточной степенью уверенности.

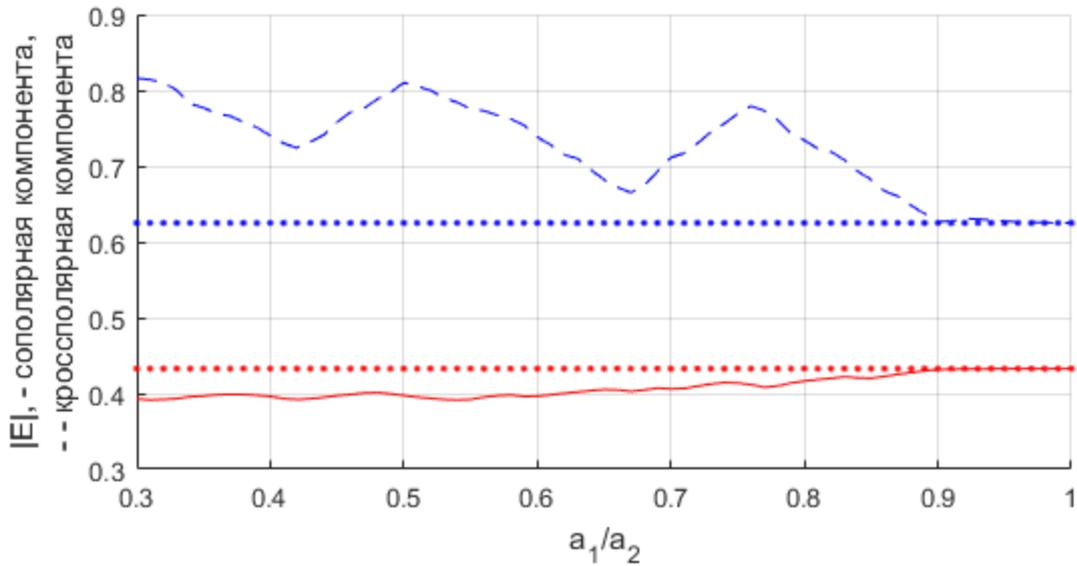


Рис. 8. Зависимость сополярной и кроссполярной составляющих рассеянного поля от отношения диаметров верхнего и нижнего оснований. При $\varepsilon = 20,12 - i 2,38$, $\lambda = 12,24$ см. Угол наблюдения $\theta = + \pi/6$.

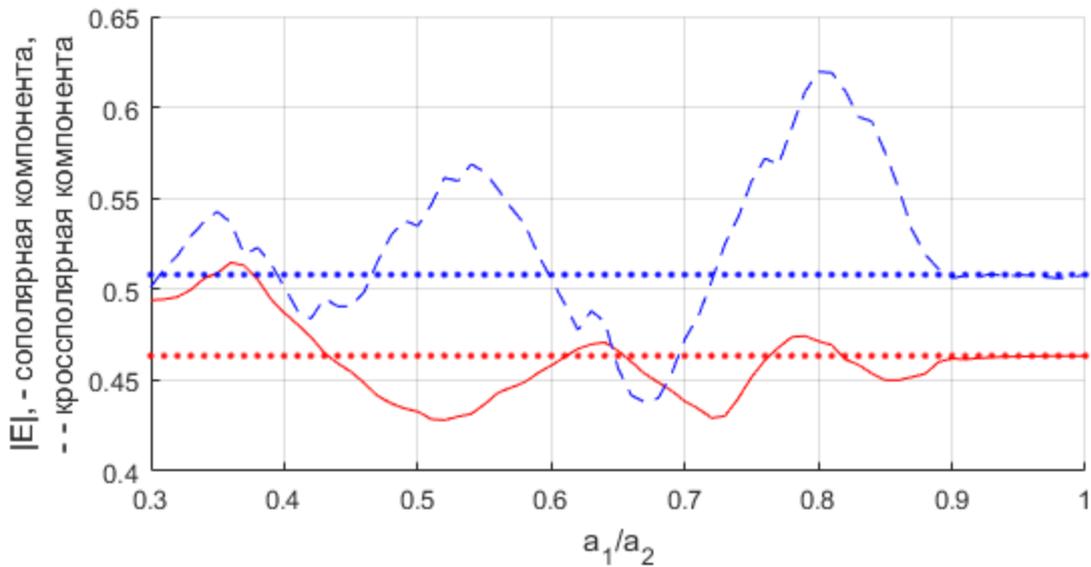


Рис. 9. Зависимость сополярной и кроссполярной составляющих рассеянного поля от отношения диаметров верхнего и нижнего оснований. При $\varepsilon = 20,12 - i 2,38$, $\lambda = 12,24$ см. Угол наблюдения $\theta = - \pi/6$.

Можно отметить интересную особенность, состоящую в том, что на рис. 6, 8, 9 наблюдается превышение кроссполярных компонент над сополярными. Для анализа этого было проведено сравнение рассеяния для конечного цилиндра, рассчитанного по МДИ, и бесконечного цилиндра по методу из [10] с алгоритмом расчёта, приведённым в [11].

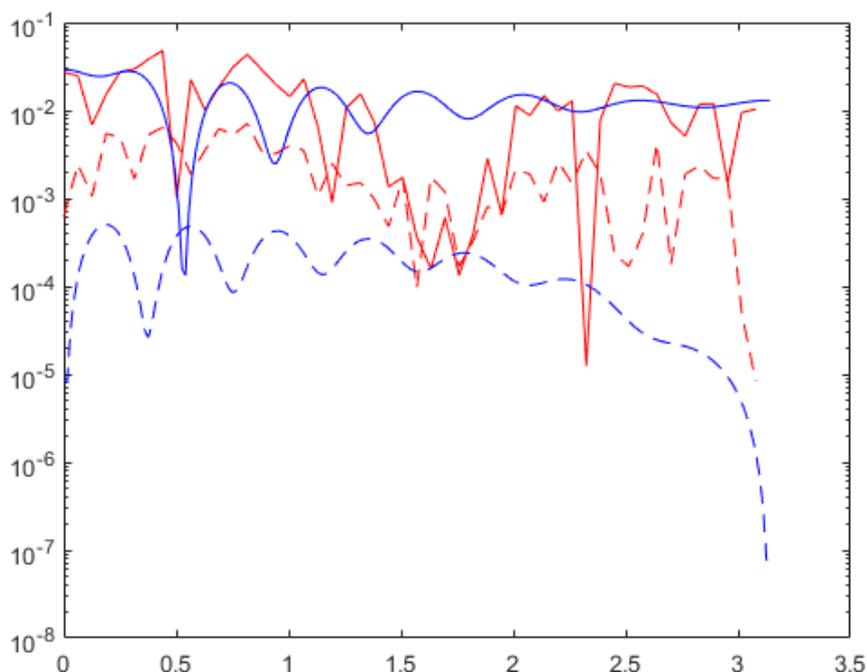


Рис. 10. Дифференциальное сечение рассеяния бесконечного цилиндра и цилиндра с размерами $a/\lambda=2$, $h/\lambda=100$. При $\varepsilon = 28,04 - i 13,34$.

При $\varepsilon = 28,04 - i 13,34$, $\lambda = 3,1$ см.

Синяя линия – бесконечный цилиндр, красная – конечный цилиндр, сплошная линия – сополярная составляющая, пунктирная – кроссполярная.

На рис. 10 видно, что при данных характеристиках рассеивателя есть угол наблюдения, при котором кроссполярные компоненты могут превышать сополярные даже для бесконечного цилиндра. В случае же наличия дополнительных особенностей рассеивателя (наличие торцов, перегибов поверхностей) таких углов рассеяния больше. Именно это и наблюдается на рис. 6-9, которые построены при определённых углах наблюдения.

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 в виде усечённых конусов. Приведены зависимости характеристик рассеяния при различных соотношениях геометрических параметров рассеивателей, длины падающей волны и электрических характеристиках. Были получены угловые поляризационные характеристики рассеянного поля.

Следует отметить сложный характер поведения поляризованных составляющих рассеянного поля в зависимости от отношения диаметров оснований усечённого конуса. Наличие закруглений оснований конуса приводит к некоторому уменьшению динамики уровня угловых лепестков, однако характер поведения зависимостей остается достаточно изрезанным.

Данная работа является частью исследования отдельных рассеивателей, как составных частей для построения моделей реальных деревьев, проверкой составных частей этих моделей. Такое исследование необходимо для рационального составления библиотеки угловых характеристик рассеянного поля объектов наиболее подходящих форм при моделировании прохождения электромагнитной волны через растительность.

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

Результаты представленной работы были обсуждены на заседании VI Всероссийской микроволновой конференции, проходившей 28-30 ноября 2018г. 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. Ерёмин Ю.А., Свешников А.Г. Метод дискретных источников в задачах рассеяния электромагнитных волн. // Успехи современной радиоэлектроники. 2003. № 10. с. 3.

5. 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.
6. 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.
7. Афонин А.А., Тимофеев В.А. Анализ численного моделирования рассеяния радиоволн на составном цилиндре и усечённом конусе. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2017. N9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/1/text.pdf>
8. 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.
9. Калинкевич А.А., Крылова М.С., Масюк В.М., Каковкина А.Ю., Хромец Е.А. Об опыте измерения диэлектрической проницаемости «живой» древесины / III Всероссийская конференция «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации и связи», г. Муром, 26.06-01.07.2010г. (электронный сборник трудов), стр. 169-174.
10. Bohren, C. F. and Huffman, D. R., Absorption and scattering of light by small particles, Wiley-Interscience, New York, 1998.
11. Schäfer, J.-P., Implementierung und Anwendung analytischer und numerischer Verfahren zur Lösung der Maxwellgleichungen für die Untersuchung der Lichtausbreitung in biologischem Gewebe, PhD thesis, Universität Ulm, 2011, URL: <http://vts.uni-ulm.de/doc.asp?id=7663>

Для цитирования:

А. А. Афонин, В. А. Тимофеев. Поляризационные компоненты рассеяния микроволнового излучения для некоторых моделей элементов растительности. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jun19/14/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.6.14