



УДК 621.396.67

Б. А. Панченко, О. П. Пономарев, Д. В. Денисов

Быстрый расчет характеристик рассеяния линзы Люнеберга

Методом тензорных функций Грина решена задача дифракции электромагнитной волны линейной поляризации на многослойных телах сферической формы – металлической сфере с диэлектрическим укрытием и линзе Люнеберга. Приведено описание используемого электродинамического аппарата с проверкой полученных выражений для расчета электромагнитных полей. Проведено сравнение полученных результатов расчетов с результатами моделирования аналогичной задачи в программном пакете *ANSYS HFSS*. Представлена оценка затрат вычислительных ресурсов и машинного времени при решении задачи двумя способами.

Ключевые слова: тензорные функции Грина, линза Люнеберга, *ANSYS HFSS*.

Введение

Задача дифракции электромагнитной волны линейной поляризации на многослойных объектах представляет интерес с точки зрения расчета рассеяния полей на таких сферических телах, как металлическая сфера с защитным диэлектрическим укрытием и антенна типа линзы Люнеберга. Интерес к металлическим сферам с диэлектрическим укрытием связан, с одной стороны, с частым использованием простых объектов дифракции для калибровки в безэховых камерах и установках измерения эффективных поперечников рассеяния (ЭПР) реальных устройств и объектов, с другой – с повсеместным применением укрытий для объектов, подвергающихся электромагнитному воздействию. Подобные укрытия используются для защиты от внешних воздействий и целей радиомаскировки путем уменьшения радиолокационного коэффициента рассеяния в необходимом диапазоне углов.

В режиме дифракции линза Люнеберга формирует направленную диаграмму рассеяния на теневой стороне – это свойство линзы может иметь несколько практических применений. Например, с помощью удаленного облучателя, установленного в дальней зоне с освещенной стороны линзы, можно создавать дополнительный луч к основному облучателю, установленному на поверхности сферы, тем самым обеспечивая многолучевой режим работы. Также с помощью удаленного источника можно блокировать помеху, угловое положение

которой относительно оси линзы известно и не совпадает с направлением рабочей диаграммы направленности. Таким образом, работа линзы Люнеберга в режиме дифракции позволяет расширить функциональные возможности антенной системы на ее основе [1].

Решение задачи дифракции на линзе Люнеберга

На рис. 1 показан источник электромагнитного поля, удаленный на бесконечность ($r \rightarrow \infty$), который формирует поле линейной вертикальной поляризации E_0 , распространяющейся в направлении \mathbf{p} в сторону объекта дифракции. Падающее поле рассеивается на сферическом объекте, имеющем L слоев, границы которых являются координатными поверхностями в сферической системе координат. В зависимости от электрофизических параметров каждого слоя в рассматриваемой задаче сферический объект может представлять собой линзу Люнеберга с произвольным количеством слоев либо металлическую сферу с многослойным укрытием.

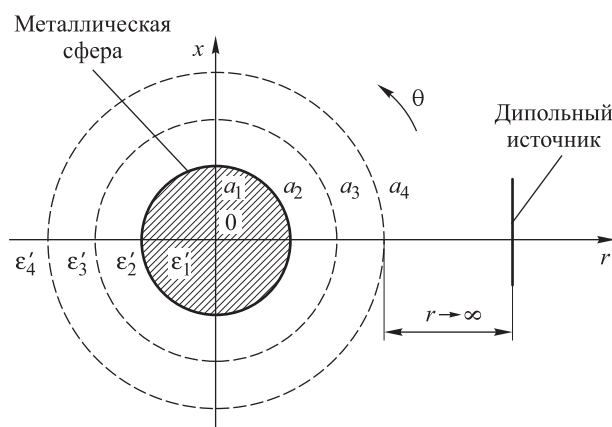


Рис. 1. Геометрия задачи дифракции волны на многослойной сфере

Задача электромагнитного возбуждения удаленным источником решалась двумя методами: с использованием электродинамического аппарата тензорных функций Грина (ТФГ) [2–4] и методом конечных элементов в программе *ANSYS HFSS*. В первом случае формула расчета напряженности электрического поля дифрагированной волны была записана в общем виде (вывод формулы приведен в работах [2, 4]):

$$\mathbf{E}(\theta) = E_0 \frac{\exp(-ik_0 r)}{(k_0 r)(k_0 a)} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left\langle \begin{array}{l} \frac{2n+1}{n(n+1)} (-1)^n \times \\ \left(\begin{array}{l} (\mathbf{a}_\theta \cos \varphi \tau_n(\theta) - \\ -\mathbf{a}_\varphi \sin \varphi \pi_n(\theta)) M_n - \\ -(\mathbf{a}_\theta \cos \varphi \pi_n(\theta) - \\ -\mathbf{a}_\varphi \sin \varphi \tau_n(\theta)) N_n \end{array} \right) \end{array} \right\rangle, \quad (1)$$

где $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число;

$$\tau_n(\theta) = \frac{\partial P_n^1(\cos \theta)}{\partial \theta}, \quad \pi_n(\theta) = \frac{P_n^1(\cos \theta)}{\sin \theta};$$

$$M_n = \frac{i\tilde{\mathbf{Z}}_n(a)j_n(k_0 a) - j'_n(k_0 a)}{i\tilde{\mathbf{Z}}_n(a)h_n(k_0 a) - h'_n(k_0 a)},$$

$$N_n = \frac{i\tilde{\mathbf{Y}}_n(a)j_n(k_0 a) - j'_n(k_0 a)}{i\tilde{\mathbf{Y}}_n(a)h_n(k_0 a) - h'_n(k_0 a)} - \text{характерис-}$$

тические части функции;

$P_n^1(\cos \theta)$ – функция Лежандра;

$h_n(x)$, $j_n(x)$ – сферические функции Бесселя – Рикацци [5];

$\tilde{\mathbf{Z}}_n$, $\tilde{\mathbf{Y}}_n(a)$ – ориентированные направленные импедансы и адмитансы, которые определяются последовательным пересчетом от внешней границы многослойной сферы к центру через частичные области-слои (методика расчета описана в работе [2]).

В качестве проверки полученной формулы рассмотрена классическая задача дифракции волны линейной поляризации на металлическом шаре, которая ранее решалась многими исследователями. На рис. 2 приведены расчи-

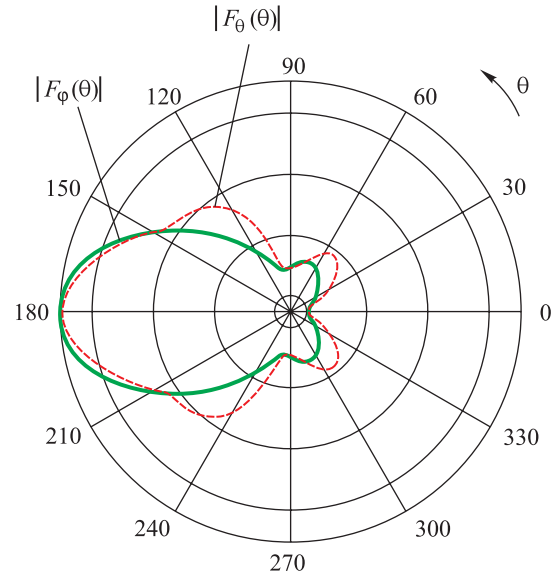


Рис. 2. Диаграммы рассеянного поля на металлической сфере $k_0 a = 3$

танные по формуле (1) диаграммы вторичного (рассеянного) поля на металлическом шаре.

При расчете диаграмм по предлагаемой в данной статье методике были получены результаты, близкие к решениям задачи дифракции на металлической сфере, опубликованным в работе [6], что может свидетельствовать о правомерности полученной записи формулы (1).

Дифракция на линзе Люнеберга в *ANSYS HFSS*

Электродинамическая модель дифракции волны линейной поляризации на линзе Люнеберга в программном пакете *ANSYS HFSS* изображена на рис. 3. Электромагнитная волна линейной вертикальной поляризации падает в направлении оси Z на многослойную сферу. Вектор электрического поля падающей волны ориентирован вдоль оси X . Параметры слоев сферы соответствуют закону Люнеберга [1]: 4 слоя с нормированными радиусами a , равными 0,53, 0,75, 0,93 и 1 см, и диэлектрической проницаемостью ϵ'_L со значениями 1,86, 1,57, 1,28 и 1.

Падающая электромагнитная волна имеет частоту 10 ГГц, радиус линзы составляет 9 см, $k_0 a \approx 6\pi$. На рис. 4 приведены результаты сравнения диаграмм рассеяния, рассчитанных в *ANSYS HFSS* и с использованием формулы (1) в *MATLAB*.

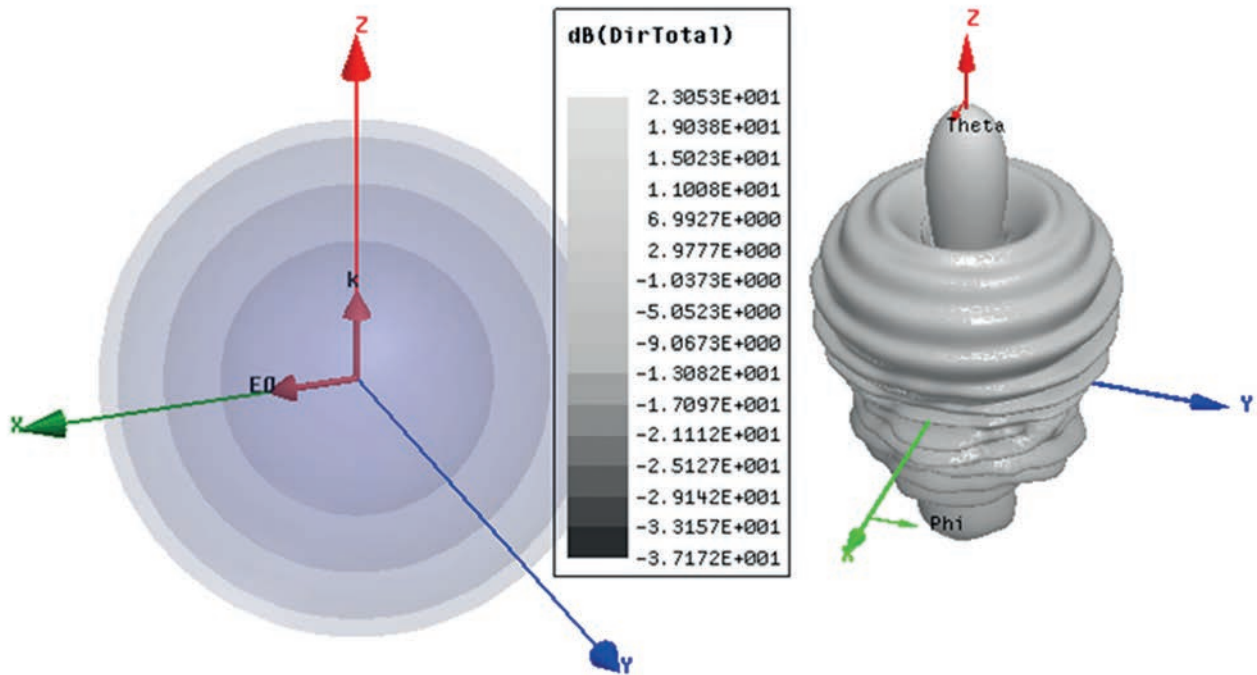


Рис. 3. Модель линзы Лунеберга в программе ANSYS HFSS

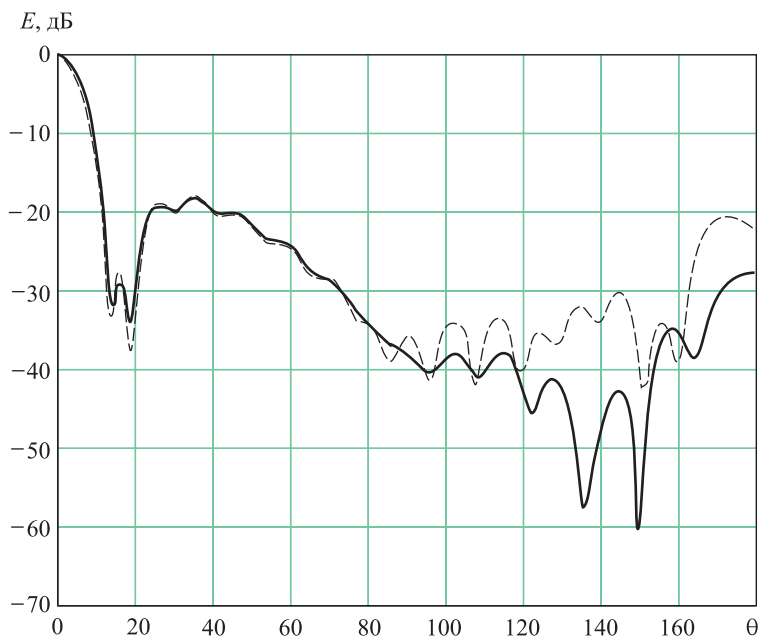


Рис. 4. Диаграммы рассеяния линзы Лунеберга с электрическим радиусом $k_0 a = 6\pi$:
 — — MATLAB; --- — ANSYS HFSS

Анализируя график, приведенный на рис. 4, можно отметить, что в диапазоне углов от 0 до 90 градусов результаты расчетов диаграммы рассеяния, полученные разными способами, имеют хорошее совпадение и довольно точно повторяют друг друга, что позволяет сделать вывод о том, что расчетная формула (1) записана корректно. Отличие заднего

(в диапазоне углов от 90 до 180 градусов) излучения в двух методах объясняется тем, что в силу математических особенностей используемых методов первичный источник излучения в дальней зоне задан по-разному. При использовании ANSYS HFSS источник задается в виде падающей плоской электромагнитной волны, а при методе ТФГ источник задается точеч-



ным, удаленным на бесконечность (в этом случае линза Люнеберга оказывается в дальней зоне относительно источника).

Кроме того, данная задача может быть легко адаптирована для решения задачи дифракции на металлическом шаре путем изменения числа слоев и их электрофизических параметров. На рис. 5 приведены диаграммы рассеяния на металлической сфере, рассчитанные двумя методами: ТФГ и с использованием *ANSYS HFSS*.

Разница при использовании *ANSYS HFSS* связана с точностью расчетов и числом разбиений на конечные участки. В таблице приведены временные затраты для решения задач, связанных с расчетом сферических объектов разного электрического размера: линзы Люнеберга и металлического шара. Расчеты проведены на персональном компьютере с процессором *Intel Core i5 3210M CPU 2.5 GHz*

и объемом оперативной памяти 8 Гб в лицензированном программном пакете электродинамического анализа *ANSYS HFSS*.

Анализируя результаты, приведенные в таблице, можно отметить, что время расчета неоднородных сферических структур методом ТФГ минимум на два порядка меньше времени расчета по сравнению с использованием метода конечных элементов в *ANSYS HFSS*. Подобная существенная экономия времени вычисления позволяет интегрировать предложенный метод расчета в различные автоматизированные системы для анализа в режиме реального времени.

Заключение

Полученные расчеты могут быть использованы для определения дифракционных и радиолокационных характеристик объектов. Предложенный математический аппарат обладает существенным быстродействием для расчета

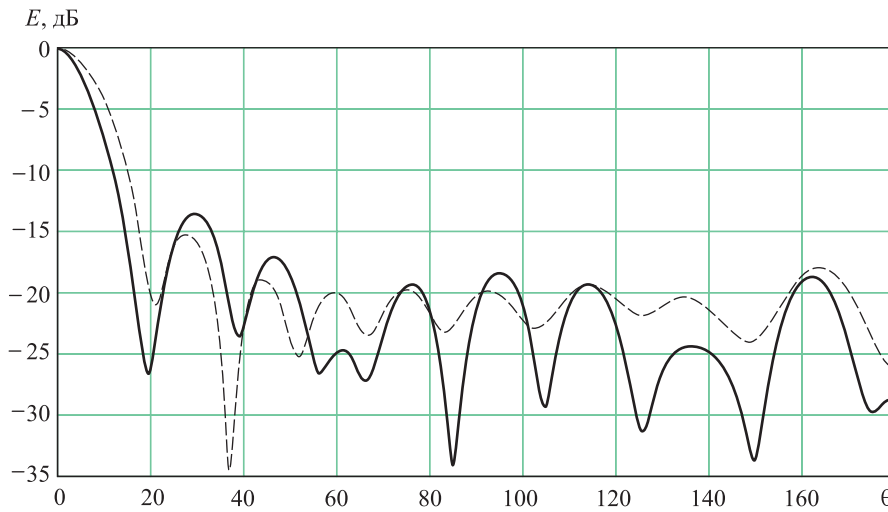


Рис. 5. Рассеяние на металлической сфере размером $k_0a = 4\pi$:
 — — ТФГ; - - - - *ANSYS HFSS*

Результаты расчетов в программном пакете *ANSYS HFSS* и *MATLAB*

Размеры сферического тела	Время расчета линзы Люнеберга в <i>HFSS</i> , с		Время расчета металлической сферы в <i>HFSS</i> , с		Время расчета линзы Люнеберга в <i>MATLAB</i> , с	Время расчета металлической сферы в <i>MATLAB</i> , с
	<i>Direct Solver</i>	<i>Iterative Solver</i>	<i>Direct Solver</i>	<i>Iterative Solver</i>	Тензорных функций Грина	Тензорных функций Грина
$k_0a = \pi$	38	22	13	13	0,2	0,24
$k_0a = 2\pi$	129	26	14	14	0,6	0,27
$k_0a = 4\pi$	182	83	21	22	1,5	0,29
$k_0a = 6\pi$	1024	227	30	33	2,2	0,4
$k_0a = 8\pi$	4320	839	50	54	3,6	0,59



характеристик рассеяния линзы Люнеберга и может быть эффективно использован при первичном анализе антенных систем на базе этой линзы. Результаты разработанной методики расчета могут быть использованы при проектировании сканирующих антенных радиолокационных систем обнаружения и сопровождения объектов, в том числе многолучевого типа.

Список литературы

1. *Luneburg R. K.* The Mathematical theory of optics. Providence, Rhode Island: Brown University Press, 1944. 401 p.

2. *Панченко Б. А.* Рассеяние и поглощение электромагнитных волн неоднородными сферическими телами. М.: Радиотехника, 2013. 268 с.

3. *Панченко Б. А., Денисов Д. В., Мусин А. М., Скуматенко И. О.* Тензорные функции Грина для расчета электромагнитных полей от слоистых сферических структур // Вестник СибГУТИ. 2016. № 2. С. 18–24.

4. *Панченко Б. А., Денисов Д. В.* Антенные характеристики линзы Люнеберга при круговой поляризации поля // Антенны. 2013. № 12 (199). С. 26–30.

5. *Абрамовиц М., Стиган И.* Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979. 832 с.

6. *Марков Г. Т., Чаплин А. Ф.* Возбуждение электромагнитных волн. М.: Радио и связь, 1983. 296 с.

Поступила 09.03.17

Панченко Борис Алексеевич – доктор технических наук, профессор Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, автор более 300 печатных работ, в том числе 7 монографий. Область научных интересов: техническая электродинамика, теория и техника антенн.

Пономарев Олег Павлович – доктор технических наук, профессор Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. Заместитель генерального директора по научно-техническому развитию, главный конструктор Акционерного общества «Уральское производственное предприятие «Вектор». Автор более 100 печатных работ.

Область научных интересов: теория дифракции, численное моделирование антенн.

Денисов Дмитрий Вадимович – кандидат технических наук, доцент «Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики», ведущий инженер-конструктор Акционерного общества «Уральское производственное предприятие «Вектор». Автор более 20 печатных работ.

Область научных интересов: телекоммуникации, теория и техника антенн.

Quick calculation of Luneberg lens scattering signature

The paper focuses on solving the problem of diffraction of a linear polarization electromagnetic wave on multilayer bodies of a spherical shape, i.e. a metal sphere with a dielectric cover and Luneberg lens. For this purpose tensor Green function method was used. Within the research we described the electrodynamic system verifying the expressions obtained for the calculation of electromagnetic fields. Furthermore, we compared the obtained results of calculations with the results of simulation of a similar problem in the software package ANSYS HFSS. Finally, we estimated the computational burden and computing time for solving the problem in two ways.

Keywords: tensor Green functions, Luneberg lens, ANSYS HFSS.

Panchenko Boris Alekseevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. Author of over 300 published works, 7 monographs among them.

Science research interests: technical electrodynamics, antenna theory and technology.

Ponomarev Oleg Pavlovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. Deputy Director General for Scientific and Technical Development, Chief Designer, Joint Stock Company “Ural Industrial Enterprise “Vector”. Author of over 100 published works.

Science research interests: diffraction theory, computational simulation of antennas.

Denisov Dmitry Vadimovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Leading Design Engineer, Joint Stock Company “Ural Industrial Enterprise “Vector”. Author of over 20 published works.

Science research interests: telecommunications, antenna theory and technology.