

УДК 621.396.969.34

А. М. Мусин, К. М. Зейде  
Уральский федеральный университет  
им. первого Президента России Б. Н. Ельцина

## Влияние вращения сферического тела, покрытого диэлектриком, на характеристики рассеяния<sup>1</sup>

Приведен расчет коэффициентов рассеяния для сферы радиусом 250 мм с диэлектрическим покрытием для трех различных угловых скоростей вращения рассеивателя. Полученные результаты проанализированы.

### Дифракция, рассеяние на вращающихся телах, радиолокационные характеристики, защитные материалы

Аналитические решения дифракционной задачи для вращающейся проводящей и диэлектрической сфер получены в [1], [2] соответственно. Анализ многослойных рассеивателей с использованием функций Грина описан в [3]. Механическое вращение сферы с покрытием – комплексная задача, включающая в себя некоторые результаты исследований описанных работ, однако требующая специального подхода к постановке и решению задачи. В настоящей статье представлены результаты исследования влияния вращения на характеристики рассеяния металлической сферы, покрытой специальным диэлектриком.

В рамках настоящей статьи исследованы новые материалы, представленные в [4] и рекомендованные для промышленного использования. Полученные результаты могут найти применения в радиолокации и радиодиагностике. Наряду с этим они представляют теоретический интерес, в силу того что влияние вращения становится ощутимым только при достаточно больших угловых скоростях рассеивателя.

В настоящей статье исследуется вращение сферы (рассеивателя) радиусом  $r_1 = 250$  мм (рис. 1) с угловой скоростью  $\Omega$ , создающее дополнительные составляющие вторичного электромагнитного поля с амплитудой порядка  $\Omega r_1 / c$  ( $c$  – скорость света в вакууме). При небольших значениях  $\Omega$  влиянием этих полей можно пренебречь. В ста-

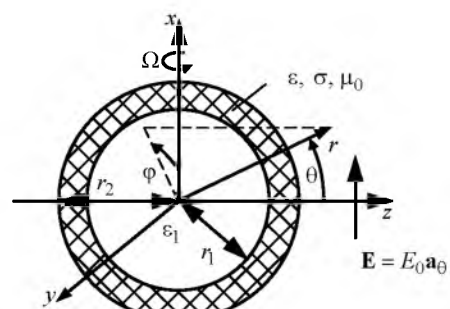


Рис. 1

тье рассмотрены значения угловых скоростей, при которых поля высших порядков становятся соизмеримыми по амплитуде с волной, рассеянной от неподвижной сферы [5]. Для анализа рассеивателя, обладающего отличными от рассмотренных угловыми скоростями, может быть использован алгоритм предсказания поведения вторичного поля, изложенный в [6].

В [7] рассмотрена неподвижная сфера с такими же укрытиями. Некоторые представленные далее результаты сравнивались с результатами настоящей работы.

**Характеристики материалов.** В качестве материала покрытия рассмотрена разработка [4]. Относительная диэлектрическая проницаемость и проводимость измерены прибором ИДХ 7003 на частоте 1 МГц (табл. 1). Магнитная проницаемость этих материалов равна магнитной проницаемости воздуха  $\mu_0$ . В настоящей статье приня-

Таблица 1

Параметр	Материал покрытия		
	ТЗМКТ-8	ТЗМКТ-8КН-АI <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ТЗМКТО-8К-ТЭАТ-МС
Толщина покрытия ( $r_2 - r_1$ ), мм	3.5	4.0	3.75
Относительная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ )	3.05	3.46	2.89
Проводимость ( $\sigma \cdot 10^6$ ), См/м	4.5	5.4	3.7

<sup>1</sup> Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-01396).

то допущение, что представленные параметры сохраняются во всем диапазоне анализируемых частот или меняются незначительно.

В статье приведены результаты численных расчетов частотной зависимости радиолокационного коэффициента рассеяния для неподвижной сферы, а также для сферы при различных фиксированных скоростях вращения.

#### Метод решения электродинамической задачи.

На рис. 1 изображена геометрия задачи, которая решается электродинамическим методом в сферической системе координат  $(r, \theta, \varphi)$ . Единичные орты  $\mathbf{a}_r$ ,  $\mathbf{a}_\theta$  и  $\mathbf{a}_\varphi$  (на рис. 1 не обозначены) направлены вдоль соответствующих осей. Падающая электромагнитная волна линейной поляризации  $\mathbf{E} = E_0 \mathbf{a}_\theta$  ( $E_0$  – амплитуда напряженности падающей волны) рассеивается вращающейся с угловой скоростью  $\Omega$  металлической сферой с радиусом  $r_1 = 250$  мм и диэлектрическим покрытием толщиной  $r_2 - r_1$ , обладающим относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , проводимостью  $\sigma$  и магнитной проницаемостью  $\mu_0$ .

Для расчета характеристик рассеяния использован аппарат тензорных функций Грина [8]. Радиолокационный коэффициент рассеяния записывается следующим образом:

$$\Gamma_p = \frac{1}{(k_0 r_1)^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) (M_n - N_n) \right|^2, \quad (1)$$

где  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  – волновое число в свободном пространстве ( $\lambda_0$  – длина волны);  $M_n$  и  $N_n$  – коэффициенты, определяемые структурой сферического тела.

Коэффициенты определяются следующим образом:

$$M_n = \frac{i\bar{Z}_n(\gamma_n, r_2) \nu_n(k_0 r_2) - \nu'_n(k_0 r_2)}{i\bar{Z}_n(\gamma_n, r_2) \chi_n^{(2)}(k_0 r_2)},$$

$$N_n = \frac{i\bar{Y}_n(\gamma_n, r_2) \nu_n(k_0 r_2) - \nu'_n(k_0 r_2)}{i\bar{Y}_n(\gamma_n, r_2) \chi_n^{(2)}(k_0 r_2)},$$

где  $\bar{Z}_n$  и  $\bar{Y}_n$  – ориентированные импеданс и адмитанс соответственно, отсчитываемые от границы между покрытием и свободным пространством в направлении начала координат (см. рис. 1);  $\gamma_n$  – постоянная распространения в диэлектрическом покрытии;  $\nu_n(\cdot)$ ,  $\chi_n^{(2)}(\cdot)$  – функции Риккати–

Бесселя  $n$ -го порядка и Риккати–Ганкеля 2-го рода  $n$ -го порядка [10] соответственно;

$$\bar{Z}_n(\gamma_n, r_2) = \bar{Z}_n(\gamma_n, r_2) + \bar{Z}_n(\gamma_n, r_2);$$

$$\bar{Y}_n(\gamma_n, r_2) = \bar{Y}_n(\gamma_n, r_2) + \bar{Y}_n(\gamma_n, r_2),$$

причем  $\bar{Z}_n$  и  $\bar{Y}_n$  – ориентированные импеданс и адмитанс, соответственно, отсчитываемые от границы между покрытием и свободным пространством в направлении свободного пространства [11]; знаком “~” обозначена нормировка к импедансу и адмитансу свободного пространства, а штрихами – производные функций по координате  $r$ .

Постоянная распространения в диэлектрическом покрытии  $\gamma_n$  определяется выражением, полученным в [11]:

$$\gamma_n^2 = k_0^2 N^2 - i\omega \mu_0 \sigma + \frac{n\Omega\omega}{c^2} \left( 2N^2 - 2 - i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right), \quad (2)$$

где  $N = \sqrt{\epsilon \mu}$  – коэффициент рефракции ( $\mu = 1$  – относительная диэлектрическая проницаемость);  $\omega = 2\pi c/\lambda_0$ .

Отсюда следует, что если сферическое тело не вращается ( $\Omega = 0$ ), постоянная распространения не зависит от  $n$ .

**Влияние вращения сферического тела на характеристики рассеяния.** Расчет зависимости радиолокационной характеристики от электрического радиуса сферы проведен для материалов из табл. 1. На рис. 2 приведены зависимости  $\Gamma_p$  (1) для  $\Omega = 0$  (сплошные линии),  $3.6 \cdot 10^7$  рад/с (штриховые линии) и  $18 \cdot 10^7$  рад/с (штрих-пунктирные линии) для исследованных покрытий.

В табл. 2 приведены значения попутного коэффициента рассеяния

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{1}{(k_0 r_1)^2} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (M_n + N_n) \right|^2$$

для рассмотренных покрытий и тех же скоростей вращения рассеивателя.

**Анализ результатов.** Анализируя полученные результаты, можно сделать ряд выводов в отношении сравнения характеристик рассеяния для неподвижной и вращающейся сфер. Различия в указанных характеристиках вызваны главным образом тем, что при ненулевой угловой скорости на поверхности рассеяния возникает электрический ток, порожденный ускоренным движением заряженных частиц, находящихся в материале покрытия. От-

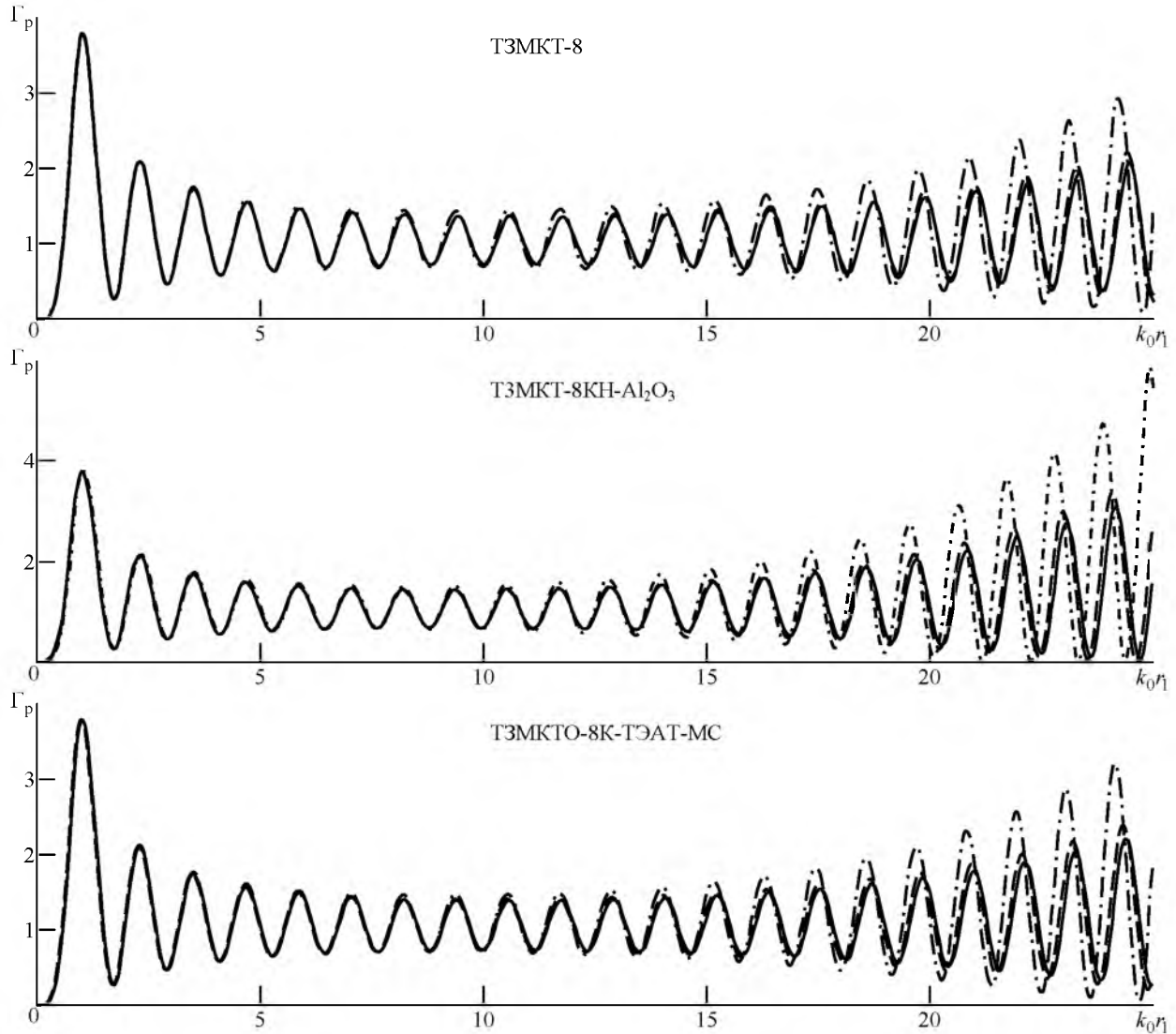


Рис. 2

Таблица 2

$\Omega \cdot 10^{-6}$ , рад/с	$k_0 r_1$			
	10	15	20	25
$\Gamma_{II}$				
ТЗМКТ-8				
0	129.4352398	311.1053799	600.1949124	1010.289175
3.7	130.52952	315.3929594	610.9932012	1029.954017
18.7	134.8298434	332.4669906	652.2266635	1092.68756
ТЗМКТ-8КН-Al2O3				
0	136.3087743	337.2693014	662.6355684	1103.351456
3.7	137.766958	343.1379118	676.0728788	1112.602508
18.7	143.5309717	366.2756197	727.7954806	1162.332626
ТЗМКТ-8К-ТЭАТ-МС				
0	130.7104418	315.7194947	611.0439344	1028.674249
3.7	131.8959274	320.3711662	622.5011176	1048.683563
18.7	136.5678693	338.9046766	666.0333009	1104.411904

личная от нуля проводимость поверхности рассеяния определяет плотность этого тока. Материальные уравнения Максвелла и граничные условия вычисляются с учетом этого вклада, который в конечном итоге выражается в третьем слагаемом формулы (2). Более подробную информацию читатель может

найти в [1], [11]. Далее приведено формальное изложение результатов исследования.

Во-первых, при незначительных электрических радиусах рассеивателя ( $k_0 r_1 < 5$ ) влияние вращения на радиолокационный коэффициент

рассеяния пренебрежимо мало. Причем значение минимального электрического радиуса, при котором влияние вращения начинает ощущаться (в рамках данного исследования), уменьшается с ростом скорости вращения сферы. Это справедливо для всех рассматриваемых покрытий.

Во-вторых, значения локальных максимумов и минимумов изменяются. Для всех рассматриваемых покрытий с увеличением  $\Omega$  локальные максимумы становятся больше, а минимумы – меньше.

В-третьих, с увеличением скорости вращения локальные максимумы и минимумы  $\sigma_{\Pi}$  смещаются в области более низких частот.

Проанализировав полученные значения для попутного коэффициента рассеяния, можно сделать вывод, что с ростом скорости вращения плотность потока мощности в попутном направлении в области высоких частот увеличивается квазилинейно. Причиной этого является возрастание вклада поля высших порядков во вторичное поле. Подобная ситуация наблюдается для всех рассмотренных диэлектриков, однако для укрытия из ТЗМКТ-8КН- $Al_2O_3$ , при  $k_0 r_1 > 20$  и  $\Omega = 18.7 \cdot 10^6$  рад/с возникают осцилляции коэффициента  $\Gamma_{\Pi}$  (рис. 3).

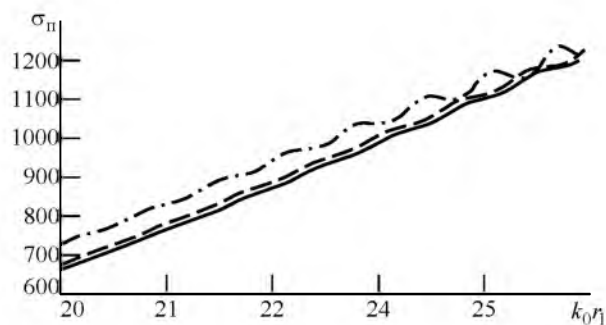


Рис. 3

Подобный эффект может быть объяснен максимальной (из рассматриваемых) проводимостью покрытия, что, в свою очередь, сказывается на увеличении вклада обратного рассеяния (отражения). При определенных значениях электрического радиуса и угловой скорости вращения сферы часть попутного потока мощности компенсируется отраженной от рассеивателя мощностью.

В настоящей статье получены радиолокационные характеристики для новых материалов покрытия при специфических условиях их использования. Полученные результаты согласуются с ранее полученными данными и расширяют их применимость.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zutter de D. Scattering by a rotating conducting sphere // IEEE Trans. on ant. and propag. 1984. Vol. AP-32, iss. 1. P. 95–98.
2. Zutter de D. Scattering by a rotating dielectric sphere // IEEE Trans. on ant. and propag. 1980. Vol. AP-28, iss. 5. P. 643–651.
3. Knyazev S., Lesnaya L., Sabunin S. Green's functions of multilayered cylindrical structures and their application for radiation, propagation and scattering problems solving // 2011 SBMO/IEEE MTTs Int. Microwave and Optoelectronics Conf.: Program and Book of Abstracts. Natal, Brazil. 29 Oct. – 1 Nov., 2011. Piscataway: IEEE, 2011. P. 748–752.
4. Койтов С. А., Мельников В. Н. Разработка наноструктурированного полимерного композиционного материала, армированного тугоплавким наполнителем // Вестн. концерна ПВО "Алмаз-Антей". 2013. Вып. 1(9). С. 64–69.
5. Зейде К. М. Анализ параметров вычислительного эксперимента по рассеянию ЭМВ от вращающегося цилиндра // Фундаментальные исследования. 2015. № 2, ч.16. С. 3503–3507.
6. Zeyde K. Linear dependences of secondary field parameters versus angular velocity of scatterer // Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON-2015), Omsk, 20–22 May 2015. Omsk: The Tomsk IEEE Chapter & Student Branch, 2015. P. 1–4.
7. Панченко Б. А., Мусин А. М. Влияние теплозащитного покрытия выпуклых тел на радиолокационные характеристики // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. Вып. 6. С. 3–5.
8. Панченко Б. А. Рассеяние и поглощение электромагнитных волн неоднородными сферическими телами. М.: Радиотехника, 2012. 292 с.
9. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука. 1979. 830 с.
10. Фелсен Л., Маркувиц Н. Излучение и рассеяние волн: в 2 т. Т. 1. М.: Мир, 1978. 547 с.
11. Zutter de D. Scattering by a rotating circular cylinder with finite conductivity // IEEE Trans. on ant. and propag. 1983. Vol. AP-31, iss. 1. P. 166–169.

A. M. Musin, K. M. Zeyde  
Ural Federal University

## The influence of rotation of spherical bodies with dielectric coating on its radar characteristics

*Dispersion ratio for sphere in diameter of 500 mm with the heat-shielding covering, for tree different angular velocities, was calculated. Produced the analysis of obtained results.*

Diffraction, scattering by a rotating objects, radar-tracking characteristics, protective materials

Статья поступила в редакцию 8 октября 2015 г.

УДК 621.396.663:51

М. Е. Шевченко, В. Н. Малышев, Д. Н. Файзуллина  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Совместное обнаружение и пеленгование с использованием коммутируемой антенной решетки<sup>1</sup>

*Разработаны и исследованы алгоритмы совместного обнаружения и пеленгования в частотной области в широкой полосе частот при отсутствии перекрытия спектров соседних сигналов, получаемых с помощью коммутируемой круговой антенной решетки. Показано энергетическое и вычислительное преимущество алгоритма с первичным обнаружением по амплитудному спектру и вторичным пеленгованием в отсчетах, содержащих сигнальные составляющие, перед алгоритмом с первичным пеленгованием во всех частотных отсчетах с последующим обнаружением частотных отсчетов, в которых присутствуют сигнальные составляющие.*

### Круговая коммутируемая антенная решетка, совместное обнаружение и пеленгование, оценка пеленга и угла места, УКВ-диапазон

В УКВ-диапазоне для радиопеленгации достаточно давно применяются круговые коммутируемые  $M$ -элементные антенные решетки (АР), конструктивно реализованные в одном изделии. В частности, они используются в аэродромных радиопеленгаторах [1] и в широкополосном сканирующем пеленгаторе [2]. Коммутируемость каналов позволяет использовать двух- или трехканальное радиоприемное устройство (РПУ) вместо  $M$ -канального. За счет этого облегчается калибровка трактов РПУ, снижаются стоимость и габариты пеленгатора.

Как правило, в коммутируемых АР одна антенна подключена к опорному (некоммутируемому) каналу, а остальные последовательно подключаются с помощью коммутатора ко второму – коммутируемому каналу приема (рис. 1).

На рынке представлен серийно выпускаемый радиопеленгатор УКВ-диапазона DDF550 "Rohde-&Shwarz", который формирует частотно-азимутальную панораму в полосе 80 МГц, пеленгует слабые (ниже уровня шума) шумоподобные сигналы [2]. В будущем фирма предполагает дополнить существующее программное обеспечение функцией сверхразрешения – возможностью формирования оценок пеленга нескольких источников радиолучения (ИРИ) на одной частоте.

Однако алгоритмы пеленгования в широкой полосе частот по данным от коммутируемой круговой АР в научной литературе и доступной технической документации подробно не описаны. В связи с этим была поставлена задача их собственной разработки для реализации в пеленгаторе УКВ-диапазона.

<sup>1</sup> При подготовке публикации использовались результаты работ по ОКР "Разработка пассивного когерентного локационного комплекса для охраны важных объектов", выполняемой СПбГЭТУ "ЛЭТИ" по договору с ОАО «НИИ "Вектор"» в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства при финансовой поддержке работ по проекту Министерством образования и науки Российской Федерации (постановление Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).