

## ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЯНИЯ

**М.Г. Вахитов**

Рассматриваются результаты исследования влияния параметров материала радиопоглощающего покрытия, выполненного из керамических цилиндров покрытых диэлектрическим материалом в качестве скрепляющего элемента. Покрытие применяется для снижения значения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР). Приведены результаты исследования зависимости коэффициента рассеяния от диэлектрической проницаемости цилиндров.

*Ключевые слова:* антенна, диэлектрическая проницаемость, эффективная поверхность рассеяния.

### Введение

Для количественной оценки заметности объекта введена эффективная поверхность рассеяния (ЭПР, англ. RadarCross-Section). В радиолокации ЭПР – площадь некоторой фиктивной плоской поверхности, расположенной нормально к направлению падающей плоской волны и являющейся идеальным и изотропным переизлучателем, которая, будучи помещена в точку расположения цели, создаёт у антенны радиолокационной станции ту же плотность потока мощности, что и реальная цель [1].

ЭПР является количественной мерой свойства объекта рассеивать электромагнитную волну [2]. Наряду с энергетическим потенциалом приемопередающего тракта и коэффициентом усиления (КУ) антенн радиолокационных станций (РЛС), ЭПР объекта входит в уравнение дальности радиолокации и определяет дальность, на которой объект может быть обнаружен радиолокатором. Повышенное значение ЭПР означает бо́льшую радиолокационную заметность объекта, снижение ЭПР затрудняет обнаружение.

ЭПР конкретного объекта зависит от его формы, размеров, материала, из которого он изготовлен, от его ориентации (ракурса) по отношению к антеннам передающей и приемной позиций РЛС (в том числе, и от поляризации электромагнитных волн), от длины волны зондирующего радиосигнала. ЭПР определяется в условиях дальней зоны рассеивателя, приемной и передающей антенн радиолокатора.

Основной характеристикой, определяющей свойства защищаемого объекта как отражающего электромагнитные излучения объекта, является эффективная поверхность рассеяния. Она характеризует способность преобразовывать падающую электромагнитную волну в рассеянную волну, распространяющуюся в направлении на приемник. В дальнейшем мы будем рассматривать однопозиционную локацию, когда приемник и передатчик расположены в одном месте. Эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) определяется как

$$\sigma = 4\pi R_0^2 \frac{S_s}{S_i},$$

где  $R_0$  – расстояние между передатчиком и объектом;  $S_s$  – плотность потока энергии рассеянной волны вблизи приемника;  $S_i$  – плотность потока энергии падающей волны вблизи тела.

### Метод решения задачи

Радиопоглощающие материалы (РПМ) и радиопоглощающие покрытия (РПП) – это класс материалов, применяемых в технологии снижения заметности («стелс-технология») для маскировки средств вооружения и военной техники от обнаружения радиолокационными средствами противника. Они являются составной частью общего направления, связанного с разработкой средств и методов уменьшения демаскирующих признаков оружия и военной техники в основных физических полях. При взаимодействии электромагнитного излучения с РПМ происходят одновременные процессы поглощения, рассеяния (вследствие структурной и геометрической неоднородности материала) и интерференции радиоволн.

Различие между собственно материалами (РПМ) и покрытиями (РПП) до некоторой степени условно и предполагает, что первые входят в состав конструкции объекта, а вторые, как правило, наносятся на его поверхности. Условность разделения связана и с тем обстоятельством, что любой радиопоглощающий материал является не только материалом, но и микроволновым устройством-поглотителем. Способность материала поглощать высокочастотное излучение зависит от его состава и структуры. РПМ и РПП не обеспечивают поглощения излучения любой частоты, напротив, материал определенного состава характеризуется лучшей поглощающей способностью при определенных частотах. Не существует универсального поглощающего материала, приспособленного для поглощения излучения радиолокационной станции (РЛС) во всем частотном диапазоне.

Существует распространенное заблуждение относительно того, что в результате применения РПМ объект становится невидимым для локаторов. В действительности, применение радиопоглощающих материалов способно лишь существенно снизить эффективную поверхность рассеяния объекта в конкретном диапазоне частот РЛС, что, однако не обеспечивает полную «невидимость» объекта при иных частотах излучения. РПМ являются лишь слагаемым обеспечения низкой заметности объекта, среди которых: конфигурация защищаемого объекта; конструктивно-компоновочные решения; широкое применение композиционных материалов, отсутствие собственных излучений и т. п.

Наличие диэлектрического покрытия может выполнять несколько функций.

Во-первых, выполнять функцию защиты от внешних воздействий.

Во-вторых, диэлектрическое покрытие должно выполнять определённое функциональное назначение. Например, снижать коэффициент рассеяния в определённом направлении. Чаще всего это направление совпадает с направлением распространения падающей на объект плоской электромагнитной волны. С точки зрения электродинамики – это задача синтеза, которая может решаться методом численной оптимизации по заданному критерию. Одним из таких критериев может быть минимум коэффициента рассеяния.

### Описание

Рассмотрим применение диэлектрических материалов, которыми покрывают идеально проводящий объект, и как такой материал влияет на коэффициент рассеяния.

В качестве диэлектрического покрытия возьмём материал, состоящий из керамических цилиндров покрытых диэлектрическим материалом в качестве скрепляющего элемента. Керамика обладает большой прочностью к внешним воздействиям ударным и статическим. Поэтому такое покрытие может служить не только для снижения коэффициента рассеяния, но и в качестве защитного покрытия. Поскольку тангенс угла диэлектрических потерь керамики зависит от частоты, для удобства расчёта предположим, что  $\operatorname{tg} \sigma = 0,0006$ . Такое же значение тангенса угла диэлектрических было выбрано и для скрепляющего диэлектрического материала.

Для исследования влияния такого покрытия на коэффициент рассеяния создадим в программе электродинамического моделирования модель тела простейших тел из идеально проводящего материала (рис. 1) и сравним коэффициент рассеяния без материала и с ним.

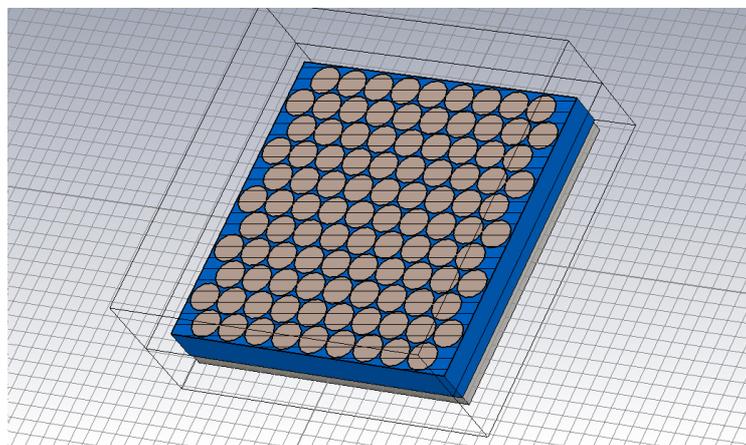
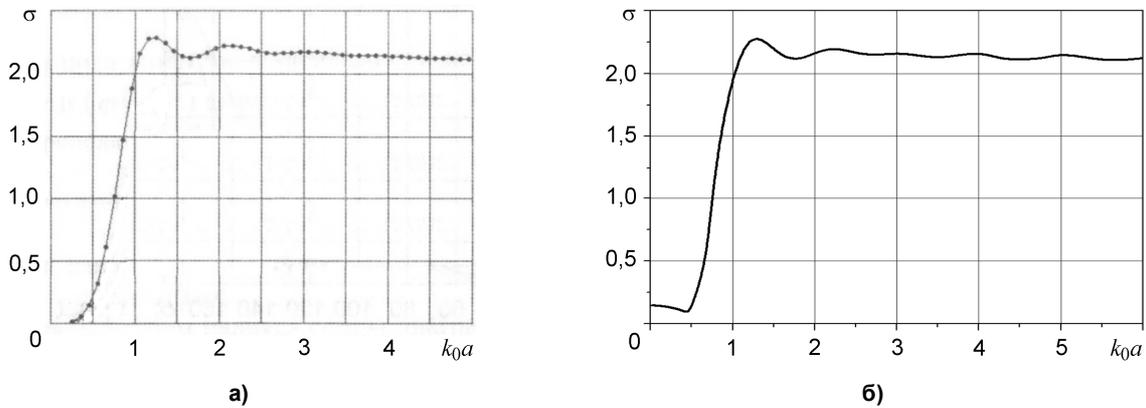


Рис. 1. Пластина с диэлектрическим покрытием

Для вычисления коэффициентов отражения от идеально проводящей сферы, создадим модель сферы в программе электродинамического моделирования. Для проверки соответствия правильности разработанной модели, сравним полученные данные с решением, полученным строгим решением задачи дифракции плоской волны на идеально проводящей сфере. Полученные результаты приведены на рис. 2.



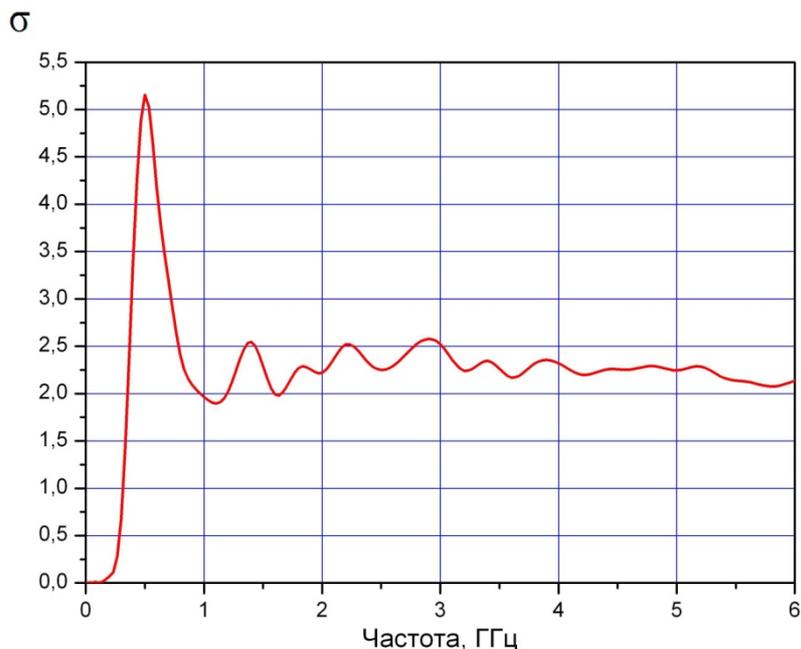
**Рис. 2.** Зависимость коэффициента рассеяния от электрического радиуса сферы: а – строгое решение; б – расчёт в программе электродинамического моделирования.  $k$  – волновое число;  $a$  – радиус сферы

Из рис. 2 видно, что полученные зависимости коэффициента рассеяния от частоты (рис. 2, б) находятся в хорошем количественном соответствии со строгим решением (рис. 2, а).

### Полученные результаты

Пусть на идеально проводящую пластину нормально падает линейно поляризованная плоская волна. Рассмотрим следующие варианты:

1. Плоская волна нормально падает на идеально проводящую пластину (рис. 3).
2. Плоская волна нормально падает на идеально проводящую пластину с диэлектрическим покрытием (рис. 4).
3. Плоская волна нормально падает на пластину из диэлектрического покрытия (рис. 5).



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента рассеяния от частоты для металлической пластины

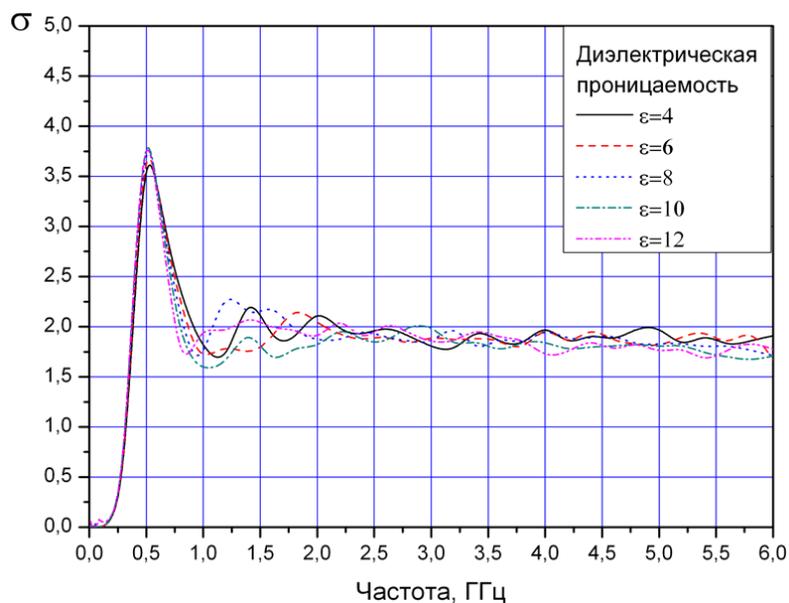


Рис. 4. Зависимость коэффициента рассеяния от частоты для металлической пластины, покрытой диэлектрическим материалом

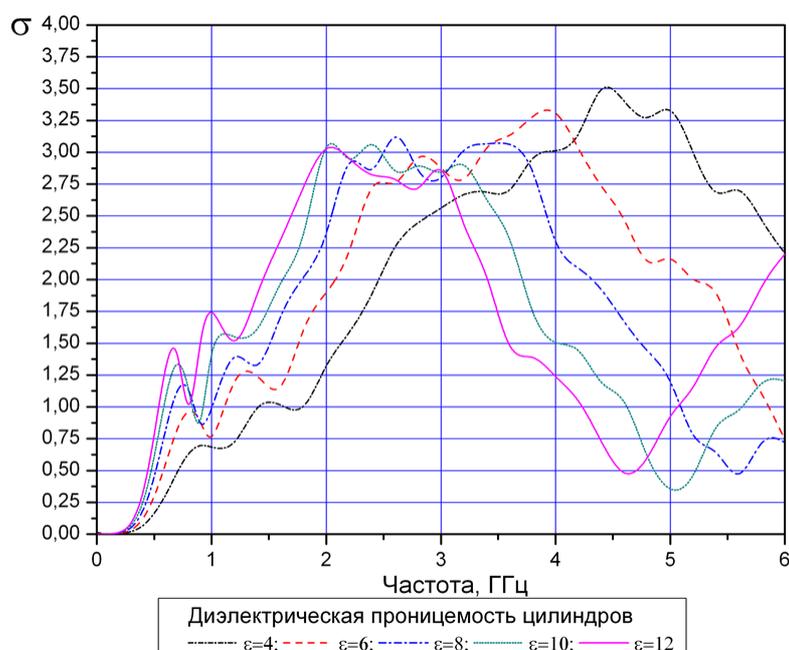
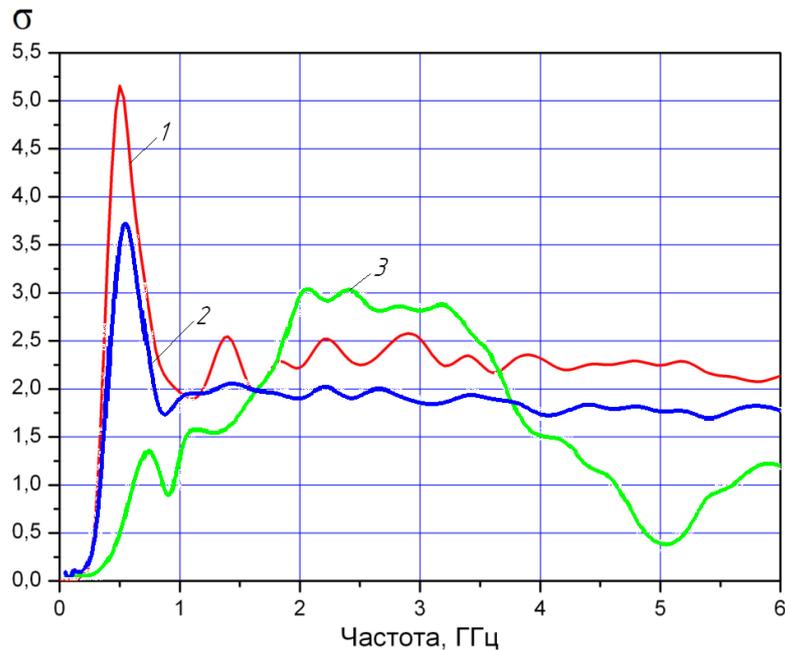


Рис. 5. Зависимость коэффициента рассеяния от частоты для пластины, выполненной из диэлектрического материала

Из анализа зависимостей, приведённых на рис. 4, видно, что на частоте 0,5 ГГц резонанс обусловленный размерами пластины. При увеличении частоты, значение коэффициента рассеяния выравнивается, а значение с увеличением диэлектрической проницаемости цилиндров уменьшается.

На рис. 5 приводятся результаты исследования коэффициента рассеяния пластины выполненной из покрытия. При значении диэлектрической проницаемости цилиндров равной 4 на частоте 4,5 ГГц наблюдается резонанс. При увеличении диэлектрической проницаемости, резонанс смещается по частоте в область низких частот. Это можно объяснить тем, что с увеличением диэлектрической проницаемости изменяется длина волны, которая распространяется в материале покрытия. При значении диэлектрической проницаемости равной  $\varepsilon = 8$ , появляется минимум коэффициента рассеяния. В дальнейшем при увеличении значения  $\varepsilon$ , минимум сдвигается в область низких частот.

На рис. 6 приведены зависимости коэффициента рассеяния от частоты для всех рассмотренных вариантов. Видно, что в случае, когда плоская волна падает на идеально проводящую пластину, в области низких частот резко возрастает коэффициент рассеяния, что можно объяснить тем, что на данной частоте пластина выступает в качестве резонатора и излучает в окружающее пространство. В области высоких частот коэффициент рассеяния носит колебательный характер.



**Рис. 6. Зависимость коэффициента рассеяния от частоты: 1 – идеально проводящая пластина; 2 – идеально проводящая пластина с диэлектрическим покрытием; 3 – диэлектрическое покрытие**

В случае проводящей пластины с диэлектрическим покрытием, видно, что в области низких частот так же наблюдается резонанс, но меньший по уровню, чем для пластины без покрытия. В области высоких частот наблюдается колебательный характер коэффициента рассеяния, но меньший по уровню, но уровень меньше, чем в случае идеально проводящей пластины. Уменьшение уровня коэффициента рассеяния можно объяснить потерями в диэлектрике, при прохождении электромагнитной волны.

При падении плоской волны на пластину из диэлектрического материала, которая выступала в качестве покрытия идеально проводящей пластины, в области низких частот наблюдается возрастание коэффициента рассеяния, в середине диапазона большое значение  $\sigma$  можно объяснить резонансными явлениями, возникающими при прохождении плоской волны. В области высоких частот происходит существенное уменьшение  $\sigma$ , поскольку для этих частот толщина покрытия составляет  $\lambda/4$ , вследствие чего, падающая и отражённая волна в материале компенсируют друг друга, что и приводит к уменьшению  $\sigma$ .

### **Выводы**

1. Получены зависимости коэффициента рассеяния для случая падения нормального плоской волны на идеально проводящую пластину, на идеально проводящую пластину с диэлектрическим покрытием, на пластину из диэлектрического покрытия.

2. Показано, что в случае падения плоской волны на пластину с диэлектрическим материалом, коэффициент рассеяния уменьшает за счёт потерь в диэлектрике.

3. При падении плоской волны на пластину из диэлектрического материала, в области высоких частот наблюдается уменьшение коэффициента рассеяния.

**Исследование выполнено в Южно-Уральском государственном университете (национальном исследовательском университете) за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00327).**

---

**Литература**

1. Финкельштейн, М.И. Основы радиолокации: учеб. для вузов / М.И. Финкельштейн. – 2-е изд. – М.: Радио и связь, 1983.
2. Skolnik, M.I. Radar Handbook / M.I. Skolnik. – 2nd ed. – McGraw-Hill Professional, 1990.
3. Панченко, Б.А. Рассеяние и поглощение электромагнитных волн неоднородными сферическими телами: моногр. / Б.А. Панченко. – М.: Радиотехника, 2013. – 264 с.
4. Фок, В.А. Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн / В.А. Фок. – М.: Советское радио, 1970. – 520 с.
5. Уфимцев, П.Я. Метод краевых волн в физической теории дифракции: моногр. / П.Я. Уфимцев. – М.: Советское радио, 1962. – 244 с.
6. Уфимцев, П.Я. Теория дифракции краевых волн в электродинамике: пер. с англ. / П.Я. Уфимцев. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 366 с.

**Вахитов Максим Григорьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); vakhitovmg@susu.ac.ru.

*Поступила в редакцию 25 декабря 2014 г.*

---

**Bulletin of the South Ural State University**  
**Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”**  
**2015, vol. 15, no. 1, pp. 139–144**

---

## APPLICATION OF RADAR ABSORBING COATINGS FOR REDUCTION OF EFFECTIVE SCATTERING SURFACE

**M.G. Vakhitov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
vakhitovmg@susu.ac.ru

The article discusses research results of parameters influence material coverings, the cylinder made of ceramic coated with a dielectric material as the fastening element. The coating is applied to reduce the values of the radar cross-section (RCS). The results of research of the dependence of the scattering coefficient of the dielectric constant of the cylinder.

*Keywords: antenna, dielectric constant, radar cross-section.*

### References

1. Finkel'shtejn M.I. *Osnovy radiolokatsii*. [Fundamentals of radar]. Moscow, Radio i svjaz', 1983.
2. Skolnik M.I. Radar Handbook. 2nd ed. McGraw-Hill Professional, 1990.
3. Panchenko B.A. *Rasseyaniye i pogloshchenie elektromagnitnykh voln neodnorodnymi sfericheskimi telami* [Scattering and absorption of electromagnetic waves by inhomogeneous spherical bodies]. Moscow, Radiotekhnika, 2013. 264 p.
4. Fok V.A. *Problemy difraktsii i rasprostraneniya elektromagnitnykh voln* [Problems of diffraction and propagation of electromagnetic waves]. Moscow, Sovetskoe radio, 1970. 520 p.
5. Ufimcev P.Ya. *Metod kraevykh voln v fizicheskoy teorii difraktsii* [Method of Boundary Waves in the Physical Theory of Diffraction]. Moscow, Sovetskoe radio, 1962. 244 p.
6. Ufimcev P.Ya. *Teoriya difraktsii kraevykh voln v elektrodinamike* [Theory of diffraction edge waves in electrodynamics]. Moscow, BINOM, Laboratoriya znaniy, 2007. 366 p.

*Received 25 December 2014*