

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.396.67

РАДИОПРОЗРАЧНЫЙ ОБТЕКАТЕЛЬ С КОМПЕНСАЦИОННЫМ СЛОЕМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ОШИБОК ПЕЛЕНГА

© 2022 г. К. М. Басков^а, С. А. Федоров^а, В. Н. Семенов^а, А. А. Политико^а*,
И. И. Краснолобов^а, В. А. Чистяев^а

^аИнститут теоретической и прикладной электродинамики РАН,
ул. Ижорская, 13, Москва, 125412 Российская Федерация

*E-mail: alexey.politiko@mail.ru

Поступила в редакцию 06.02.2020 г.

После доработки 17.09.2021 г.

Принята к публикации 18.10.2021 г.

Описан алгоритм расчета компенсационного слоя переменной толщины на поверхности радиопрозрачного обтекателя для снижения ошибок пеленга. С использованием этого алгоритма рассчитан профиль компенсационного слоя осесимметричного радиопрозрачного антенного обтекателя. Представлены результаты расчета и измерений ошибок пеленга для обтекателя с компенсационным слоем.

DOI: 10.31857/S0033849422030032

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью применения антенных систем на подвижных объектах является то, что они устанавливаются под радиопрозрачные обтекатели (РПО), которые влияют на характеристики антенн [1, 2]. В частности, наличие РПО перед антенной приводит к снижению ее коэффициента усиления, к увеличению уровня бокового излучения и кроссовой составляющей поля излучения. Кроме того, установка РПО перед антенной приводит к смещению направления нуля разностной диаграммы направленности (ДН) антенны, из-за чего возникает ошибка пеленга (ОП), которая является одной из важных характеристик локатора.

Если ОП, которые возникают из-за погрешностей в параметрах стенки РПО, уменьшить достаточно сложно, то ОП, которые связаны с искажениями фронта волны, излучаемой антенной, при прохождении стенки РПО заданной формы, снизить возможно. Основным способом снижения ОП является профилирование толщины стенки РПО, т.е. создание РПО, у которого стенка или один из ее слоев имеет переменную толщину [3].

Цель работы – решить задачу определения профиля переменной толщины стенки РПО.

1. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ПРОФИЛЯ КОМПЕНСАЦИОННОГО СЛОЯ

В алгоритме расчета профиля КС использована электродинамическая модель “антенна–РПО”, основанная на принципах физической оптики [4]. В

модели осуществлялся локальный пересчет пространственного спектра поля антенны с внутренней поверхности РПО на внешнюю. Пересчет проводили с использованием аппарата эквивалентных длинных линий, который описан в [5]. При этом предполагается, что в каждой точке поверхности РПО является локально плоской, а электрическое и магнитное поля антенны в каждой точке на внутренней поверхности РПО определяют эквивалентные токи элементарных источников, пространственные спектры которых принимаются постоянными. Пространственный спектр поля от каждого элементарного источника с помощью эквивалентных длинных линий электрического и магнитного типов пересчитывается на внешнюю поверхность РПО. Полным полем антенны с РПО в дальней зоне является сумма пространственных спектров полей всех элементарных источников, распределенных по внешней поверхности РПО.

Существуют и другие способы расчета поля антенны с учетом РПО в приближении физической оптики [6, 7], которые могут быть использованы при расчете профиля КС.

Алгоритм расчета профиля КС рассмотрим на примере системы “антенна–РПО”, представленной на рис. 1. Пусть апертура антенны имеет круглую форму. Распределение поля по ней принимаем спадающим к краю по закону косинус на пьедестале до уровня –10 дБ, при этом уровень первых боковых лепестков ДН составляет менее 20 дБ. Полагаем, что вектор электрического поля

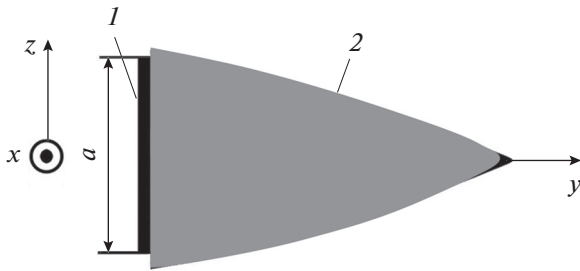


Рис. 1. Система антенна–РПО: 1 – антенна, 2 – осесимметричный обтекатель с оживальной образующей.

антенны ориентирован вдоль оси z . РПО является телом вращения оживальной формы.

Расчет профиля КС проводили следующим образом. Сначала для n углов сканирования, при которых необходима компенсация ОП, находили значения полей E_j системы “антенна–РПО” в режиме разностной ДН в направлении главного минимума. РПО задавали со стенкой и КС постоянной толщины $l_{КС}$ и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{КС}$.

Известно [3], что зависимости ОП от угла сканирования отличаются наиболее сильно в основных плоскостях сканирования (E и H). Именно в этих плоскостях будем вводить компенсацию. Поверхность РПО разбивали на m зон в виде пар четверть-колец (рис. 2). Далее для каждого j -го угла компенсации находили разницу полей ΔE_{ij} в дальней зоне от каждой i -й зоны на поверхности РПО в случае, когда толщина КС равна $l_{КС}$, и в случае, когда толщина КС равна $l_{КС} + \delta_0$ (δ_0 – малое по отношению к длине волны приращение толщины КС). Для определения ΔE_{ij} поле от i -й зоны вычисляли путем интегрирования в j -м направлении спектров полей от каждого источника, определяемые согласно методике [4], на внешней поверхности РПО только в тех точках, которые принадлежат рассматриваемой зоне. Так как приращение толщины КС δ_0 мало, а зависимость коэффициента пропускания ($K_{П}$) стенки РПО от $l_{КС}$ является аналитической функцией, то изменение в t_i раз толщины КС i -й зоны приведет к изменению в t_i раз и добавочного поля ΔE_{ij} . Для идеальной компенсации ОП необходимо, чтобы поле в j -м направлении было равно нулю. В результате получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) из n уравнений с m неизвестными:

$$\sum \Delta E_{ij} t_i = -E_j, \quad j = 1, \dots, n, \quad i = 1, \dots, m. \quad (1)$$

Решение СЛАУ (1) в случае $m = n$ является единственным, но может оказаться технически нереализуемым. При $n < m$ число решений СЛАУ бесконечно, причем решения являются комплексными числами. Для минимальной толщины и меньшего

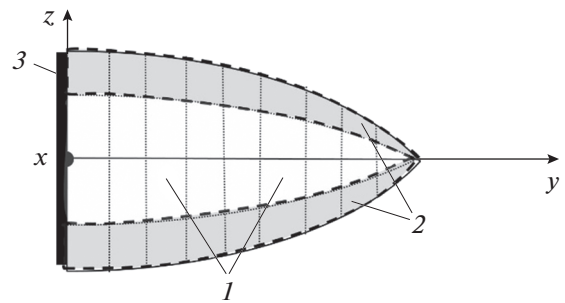


Рис. 2. Разбиение поверхности осесимметричного РПО на зоны в виде четверть-колец для расчета профиля КС: 1 – зоны разбиения в H -плоскости, 2 – зоны разбиения в E -плоскости, 3 – антенна.

влияния КС на другие характеристики РПО следует выбрать решение с минимальными по модулю значениями t_i и с минимальными мнимыми частями. Для определения наиболее эффективного варианта профиля КС следует провести проверку его влияния на все радиотехнические характеристики, используя методику расчета [4].

Выбрав одно из решений СЛАУ (1), можно определить абсолютные значения толщины h_i КС для каждой i -й зоны:

$$h_i = l_{КС} + \delta_0 \operatorname{Re}(t_i). \quad (2)$$

2. РАСЧЕТ ПРОФИЛЯ КОМПЕНСАЦИОННОГО СЛОЯ И ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОБТЕКАТЕЛЯ

Рассчитаем вариант профиля КС для 20 углов компенсации в E - и H -плоскостях и 68 зон из пар четверть-колец с размером 0.05 м вдоль оси y . Расчет полей в дальней зоне антенны с РПО проводили на средней частоте рабочего диапазона антенны по методике, описанной в [4]. Значение диэлектрической проницаемости материала КС равно 3.0, $l_{КС} = 0.3$ мм.

Рассчитанная зависимость толщины КС от координаты y вдоль оси РПО показана на рис. 3 (сплошные кривые). Далее для реализации КС будем использовать более простой профиль (пунктирные кривые).

На рис. 4 представлены рассчитанные зависимости ОП $\Delta\theta_C$ от углов сканирования θ_C в E - и H -плоскостях для случаев, когда стенка РПО имеет КС (кривая 1) и когда стенка РПО имеет КС с изменением толщины (кривая 2). На рис. 4 видно, что введение КС уменьшает максимальную ОП в два раза. Расчеты проведены на верхней частоте рабочего диапазона антенны, где наблюдаются максимальные значения ОП.

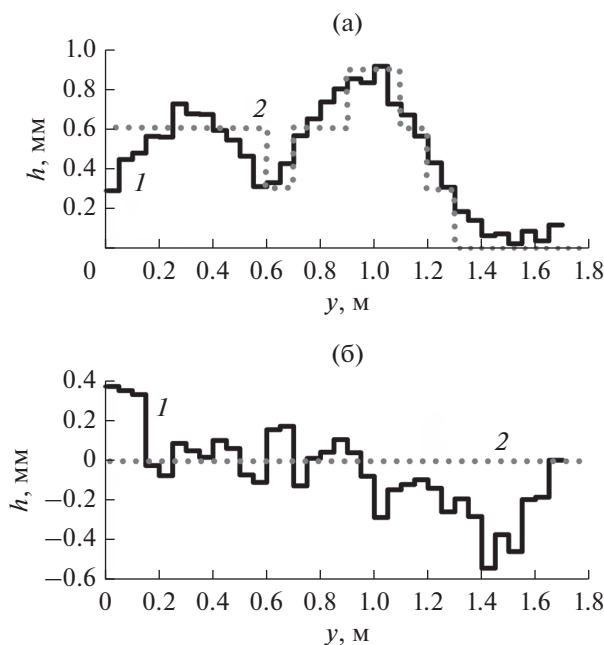


Рис. 3. Рассчитанная (1) и предлагаемая для реализации (2) зависимость толщины КС h от координаты y вдоль оси РПО в E -плоскости (а) и в H -плоскости (б).

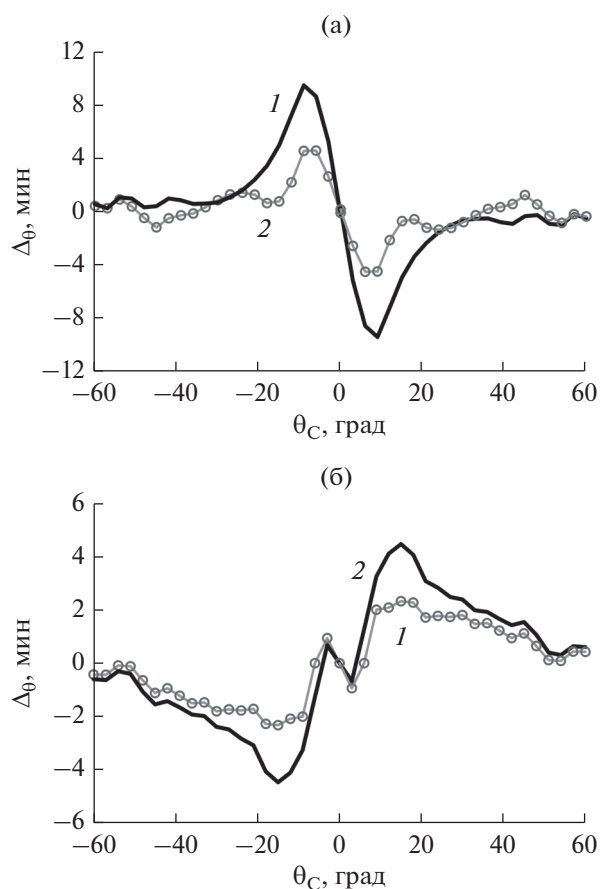


Рис. 4. Рассчитанные зависимости ОП от углов сканирования в E -плоскости (а) и в H -плоскости (б): РПО без КС (1) и с КС (2).

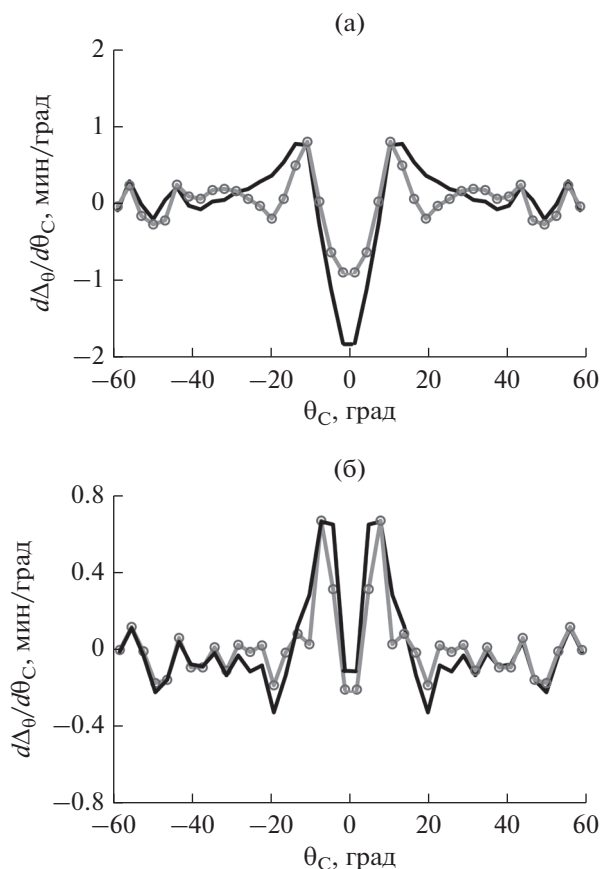


Рис. 5. Рассчитанные производные зависимости ОП от углов сканирования в E -плоскости (а) и в H -плоскости (б): РПО без КС (1) и с КС (2).

На рис. 5 представлены значения первых производных зависимостей ОП от углов сканирования в E - и H -плоскостях. Видно, что введение КС приводит также к уменьшению первых производных зависимостей ОП от углов сканирования в обеих плоскостях. Эта характеристика, так же как и максимальное значение ОП, является важной, так как именно из-за больших значений первых производных происходит срыв сопровождения целей при радиолокации.

Для оценки возможности практической реализации КС был изготовлен макет РПО с КС из пленки ПВХ толщиной 0.3 мм с диэлектрической проницаемостью 3.0.

На рис. 6 приведены измеренные и вычисленные зависимости ОП от углов сканирования в E - и H -плоскостях на верхней частоте рабочего диапазона РПО без КС и с КС. Как видно из рисунка, наличие КС приводит к снижению максимальных ОП как в E -, так и в H -плоскости не менее, чем в полтора раза.

Влияние КС на другие радиотехнические характеристики РПО заключается в небольшом

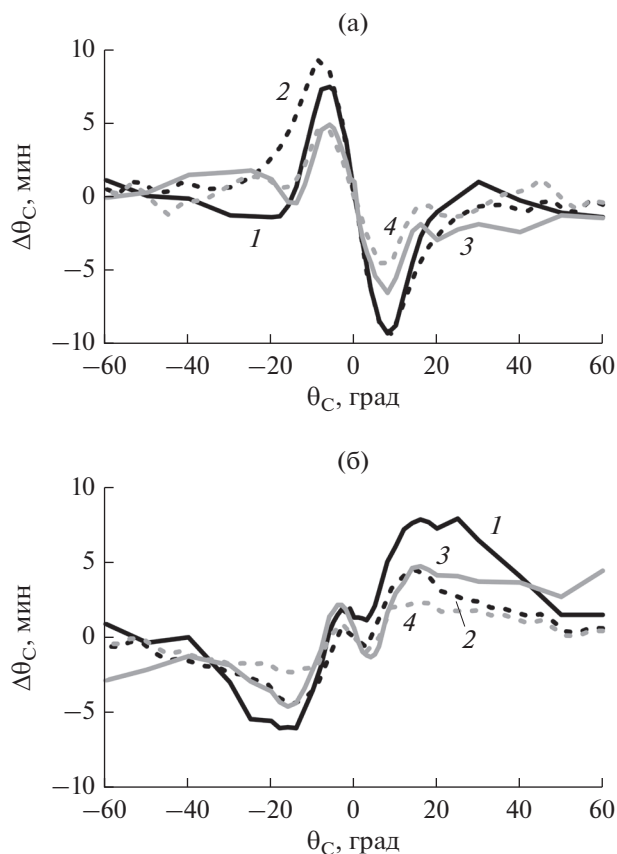


Рис. 6. Измеренные (1, 3) и вычисленные (2, 4) зависимости ОП РПО от углов сканирования в E -плоскости (а) и в H -плоскости (б): РПО без КС (1, 2) и с КС (2, 4).

снижении K_{Π} на 0.2 дБ на верхней частоте рабочего диапазона, что видно на рис. 7, где представлены измеренные и рассчитанные зависимости от угла сканирования K_{Π} РПО при отсутствии и наличии у него КС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленный в работе алгоритм позволяет эффективно рассчитывать профиль КС для снижения ОП широкого класса РПО. Описанный алгоритм также может быть применен к различным радиопрозрачным укрытиям сложной формы. Применение КС в РПО позволяет не только снизить ОП, но и снизить, что тоже важно, первую производную зависимости ОП от угла сканирования.

Применение КС в РПО, который был исследован в этой статье, привело к снижению его K_{Π} на 0.2 дБ на верхней частоте, что связано со снижением частоты настройки его стенки. Если проектировать стенку РПО с учетом КС, то можно минимизи-

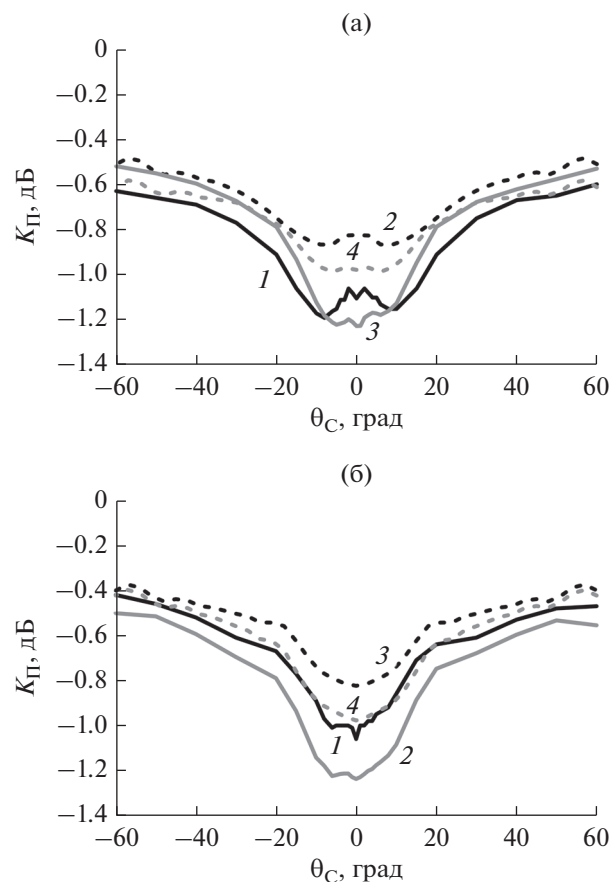


Рис. 7. Измеренные (1, 3) и вычисленные (2, 4) зависимости коэффициента пропускания РПО от углов сканирования в E -плоскости (а) и в H -плоскости (б): РПО без КС (1, 2) и с КС (2, 4).

ровать его влияние на снижение коэффициента пропускания РПО. Все это позволяет создавать РПО с высоким радиотехническим качеством.

Величина, на которую изменяется ОП при применении КС, остается практически постоянной в широком диапазоне частот. При этом ОП, которые вносит РПО в направления сканирования, на разных частотах рабочего диапазона антенны могут сильно отличаться. В итоге применение КС с профилем, рассчитанным по предложенной схеме, приводит к снижению ОП лишь в ограниченном диапазоне частот. Если применять толстый КС для более сильного снижения ОП, это приведет к ухудшению других характеристик системы “антенна–РПО”, таких как коэффициент пропускания и уровень бокового излучения антенны с РПО. Для достижения оптимального результата в заданном диапазоне частот необходимо провести расчеты основных радиотехнических характеристик РПО при нескольких вариантах профиля КС во всем рабочем диапазоне частот системы “антенна–РПО” и выбрать наиболее подходящий реализуемый вариант.

Следует отметить, что применение КС не всегда в полной мере решает задачу снижения ОП в системе “антенна–РПО”. В случаях, когда РПО вносит очень большие ОП, когда антенна обладает круговой поляризацией или меняет поляризацию, применение КС для снижения ОП невозможно. Как уже отмечалось выше, если антенна работает в широком диапазоне частот, снижение ОП с помощью КС может оказаться неэффективным. Во всех этих случаях необходимо искать другие способы улучшения радиотехнического качества РПО. Например, применение в производстве РПО метаматериалов с диэлектрической проницаемостью, близкой к единице, структура которого описана в [8], в ряде случаев помогает существенно снизить фазовые искажения фронта волны, излучаемой антенной, и, как следствие, существенно снизить ОП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shavit R.* Radome Electromagnetic Theory and Design. Croydon: Willey-IEEE Press, 2018.
2. *Gampala G., Vogel M., Reddy C.J.* // *Microwave J.* 2015. V. 58. P. 28.
3. *Каплун В.А.* Обтекатели антенн СВЧ. М.: Сов. радио, 1974.
4. *Басков К.М., Федоренко А.И., Федоров С.А.* // Журн. радиоэлектроники. 2016. № 2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb16/11/text.html>.
5. *Бодров В.В., Сурков В.И.* Математическое моделирование устройств СВЧ и антенн. М.: Изд-во МЭИ, 1994.
6. *Wu D.C.F., Rudduck R.C.* // *IEEE Trans.* 1974. V. AP-22. № 5. P. 497.
7. *Uno T., Adachi S., Sawaya K.* // *Radio Sci.* 1987. V. 22. № 6. P. 913.
8. *Басков К.М.* // Журн. радиоэлектроники. 2013. № 9. <http://jre.cplire.ru/jre/sep13/14/text.html>.