

В. Е. Пониматкин, А. А. Типикин, А. А. Шпилевой

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ АНТЕННЫХ СИСТЕМ
В НЕСУЩИЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Рассмотрена возможность использования в антенных системах дополнительного диэлектрического слоя. Благодаря явлению «укорочения» электромагнитной волны в средах с высокой диэлектрической проницаемостью существует возможность установки интегрированных антенн на поверхности несущих конструкций подвижных объектов.

Possibility of use in antenna systems of an additional dielectric layer is considered. At the expense of use of the phenomenon of «shortening» of an electromagnetic wave in environments with high dielectric permeability there is a possibility of creation of the integrated antennas on a surface of bearing designs of mobile objects.

Ключевые слова: антенно-фидерные устройства, эффект «укорочения» электромагнитной волны, интерференционный максимум, диэлектрическая проницаемость.

Key words: antenna-feeder devices, effect of «shortening» of an electromagnetic wave, interferential maximum, dielectric permeability.

В настоящее время проблема миниатюризации радиокомпонентов активно решается разработчиками радиоэлектронной аппаратуры. К наиболее сложным задачам относится уменьшение размеров антенно-



фидерных устройств (АФУ) [1], параметры которых непосредственно связаны с используемыми частотными диапазонами [2]. С одной стороны, прогресс в области построения АФУ привел к созданию высокоэффективных и достаточно компактных активных фазированных антенных решеток в диапазоне ультракоротких волн. С другой стороны, в диапазоне коротких (КВ), средних и длинных волн используются достаточно громоздкие АФУ, поэтому их интеграция в конструктивные элементы несущих конструкций представляет собой актуальную задачу. Исходя из особенностей распространения электромагнитных волн на границе раздела сред «металл–воздух», можно сделать вывод о невозможности размещения электрических антенн непосредственно на границе раздела двух сред. Для обеспечения нормальной работы в общем случае необходимо удаление антенны на расстояние, сопоставимое с длиной волны ее рабочего диапазона [3]. Одно из возможных решений – прослойка диэлектрического материала с высокой диэлектрической проницаемостью между антенной и металлическим слоем, что позволит использовать эффект «укорочения» электромагнитной волны [4].

Как известно, фазовая скорость распространения электромагнитных волн в среде зависит от ее диэлектрических свойств: увеличение диэлектрической проницаемости среды вызывает уменьшение фазовой скорости волны [5]. Но в то же время снижение скорости распространения фазы при неизменной частоте влечет за собой уменьшение длины волны, т.е. ее укорочение. Будем рассматривать диапазон КВ, актуальный для авиационной и корабельной связи на дальние расстояния, где укорочение произойдет со значений 10–100 м до значений 0,01–0,1 м.

Выясним наибольшую толщину слоя диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 10^6$, необходимую для обеспечения приема радиосигналов на частоте 3 МГц (с максимальной длиной волны $\lambda = 100$ м КВ диапазона). Для этого рассмотрим диэлектрическую подложку толщиной d , расположенную на металлическом проводнике (рис. 1).

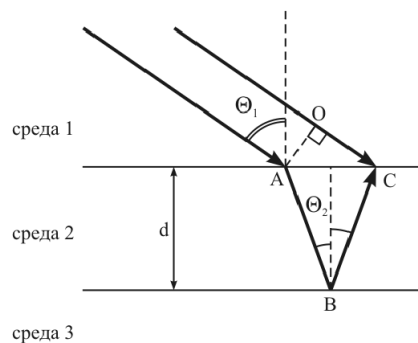


Рис. 1. Преломление и отражение электромагнитной волны на диэлектрической подложке, расположенной на металлической поверхности

На границу раздела падает луч плоской монохроматической волны, преломляясь в точке A и отражаясь в точке B . Второй луч этой же волны, приходящий в точку C , будет иметь с первым лучом разность хода [4]:



$$\Delta = n (AB + BC) - (OC - \lambda/2). \quad (1)$$

Полагаем, что показатель преломления первой среды (воздушного пространства) $n_0 = 1$, а второй среды (диэлектрической прослойки) $n_1 = n$. Из геометрического построения

$$OA = OC = 2d \operatorname{tg} \Theta_2 \sin \Theta_1. \quad (2)$$

На основе выражений (1) и (2) получаем

$$\Delta = 2dn[(1 - \sin^2 \Theta_2) / \cos \Theta_2] + \lambda/2. \quad (3)$$

Исходя из условий интерференционного максимума и при $n = \sqrt{\varepsilon} = \sqrt{10^6} = 10^3$ по формуле (3) найдем толщину слоя d для различных длин волн, учитывая нормальное падение электромагнитной волны: $\Theta_1 = 0$.

Как следует из расчетов, представленных на рисунке 2, интерференционный максимум на границе раздела сред «воздух – диэлектрик» возможен при толщине слоя в 0,025 м, при длине волны $\lambda = 100$ м, что составляет ровно четверть оптической длины волны для второй среды, с уменьшением длины волны до 10 м диэлектрический слой также уменьшается и составляет $2,5 \cdot 10^{-3}$ м.

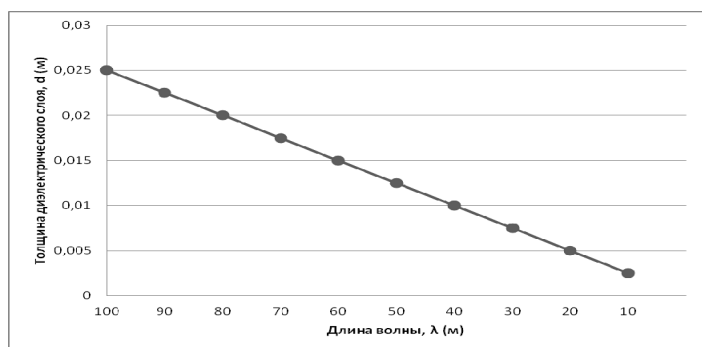


Рис. 2. График зависимости толщины диэлектрического слоя от длины волны при условии наличия интерференционного максимума на границе раздела сред «воздух – диэлектрик»

Из выражения (3) также можно найти изменение необходимой толщины слоя для достижения интерференционного максимума в зависимости от изменения угла падения электромагнитной волны Θ_1 на границу раздела сред. Очевидно, что толщина d изменяется незначительно, максимальное отклонение составляет величину порядка при длине волны $\lambda = 100$ м и пропорционально уменьшается вместе с ней, что подтверждает тезис классической электродинамики о нормальном распространении электромагнитной волны вглубь диэлектрика с большим коэффициентом оптического преломления, независимо от угла падения.

На рисунке 3 представлена диаграмма интерференционных максимумов (угловая штриховка) и минимумов (горизонтальная штриховка)



ка) для волн в диапазоне от 10 до 100 м с шагом сетки 10 м и различных оптических разностей хода лучей. Область минимума или максимума представляет собой окрестность точки экстремума радиусом $0,3\lambda$. Как видим, не существует такой относительно малой разности хода и соответствующей ей толщины диэлектрического слоя, для которых бы наблюдался интерференционный максимум на всех длинах волн используемого диапазона.

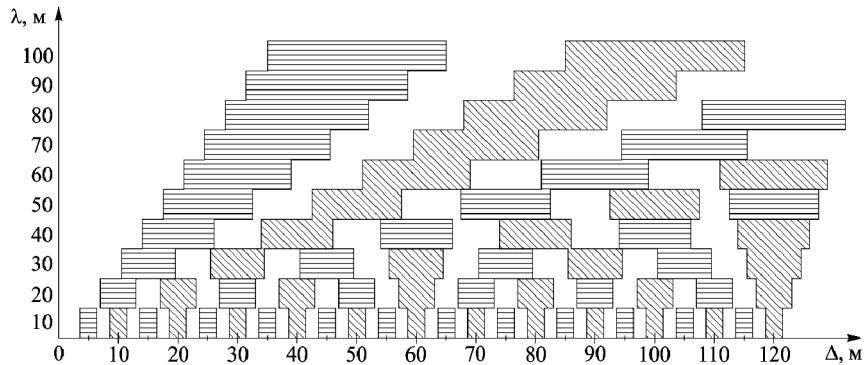


Рис. 3. Диаграмма интерференционных максимумов и минимумов для волн в диапазоне от 10 до 100 м

Теоретически, если ограничить количество длин волн рабочего диапазона конечным множеством значений, возможно найти такую оптическую разность хода, для которой на всех длинах волн будут наблюдаться интерференционные максимумы на границе раздела сред «воздух — диэлектрик». Эта оптическая разность хода являлась бы наименьшим общим кратным значением от выбранного множества, но очевидно, что толщина диэлектрического слоя в подобном случае окажется неприемлемой.

Поэтому для построения электрической антенны, которая бы находилась на диэлектрическом слое на минимальном расстоянии от металлической поверхности, необходимо решить задачу по оптимизации структуры диэлектрика с целью исключения интерференционных минимумов на границе раздела «воздух — диэлектрик», рассматривая сложение волновых колебательных процессов в точке С (рис. 1). На практике вычисления проведены нами с помощью программы Scientific Calculator Precision 90 [6].

Для того чтобы определить локальные максимумы полученной функции на отрезке $[0,25 \lambda_1, 0,25 \lambda_2]$, прежде всего необходимо найти производную выражения $f(a)$, где $a = 4pd(n^2 - \sin^2\Theta)^{1/2}$:

$$f(a) = -\frac{2a}{\lambda_2} \cos \frac{a}{\lambda_2} + \frac{a^2}{\lambda_2^2} \sin \frac{a}{\lambda_2} + \frac{2a}{\lambda_1} \cos \frac{a}{\lambda_1} - \frac{a^2}{\lambda_1^2} \sin \frac{a}{\lambda_1} + \frac{1}{a} \sin \frac{a}{\lambda_2} - \frac{1}{a} \sin \frac{a}{\lambda_1}.$$



Найдем экстремумы функции $f(a)$ методом конечных приближений с точностью 10^{-8} м. Получаем величины $d_1 = 0,025$, $d_2 = 0,02007269$, $d_3 = 0,01509378$, $d_4 = 0,01012795$, $d_5 = 0,00522178$, $d_6 = 0,0025$ м. Таким образом, диэлектрический слой можно представить в виде шестиступенчатого профиля с толщиной $d_1 - d_6$ на различных ступенях. Чтобы убедиться в отсутствии одновременного минимума на всех шести ступенях, вычислим длины волн, соответствующие интерференционным минимумам для каждой найденной толщины диэлектрического слоя. Из условия минимума получим

$$\lambda = \frac{2d\sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta_1}}{m}$$

87

Результаты представлены в таблице 1 (в скобках записаны длины волн, выходящие за КВ-диапазон).

Таблица 1

**Длины волн, соответствующие минимумам
для различной толщины слоя d и параметра m**

m	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
1	50,000	40,145	30,188	20,256	10,444	(5,000)
2	25,000	20,073	15,094	10,128	(5,222)	(2,500)
3	16,667	13,382	10,063	(6,752)	(3,481)	(1,667)
4	12,500	10,036	(7,547)	(5,064)	(2,611)	(1,250)
5	10,000	(8,029)	(6,038)	(4,051)	(2,089)	(1,000)

Аналогичным образом воспользуемся условием максимума, откуда также выразим λ :

$$\lambda = \frac{4d\sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta_1}}{2m + 1}$$

Результаты расчетов приводятся в таблице 2.

Таблица 2

**Длины волн, соответствующие максимумам
для различной толщины слоя d и параметра m
(в скобках даны длины волн, выходящие за КВ-диапазон)**

m	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
0	100,000	80,291	60,375	40,512	20,887	10,000
1	33,333	26,764	20,125	13,504	(6,962)	(3,333)
2	20,000	16,058	12,075	(8,102)	(4,177)	(2,000)
3	14,286	11,470	(8,625)	(5,787)	(2,984)	(1,429)
4	11,111	(8,921)	(6,708)	(4,501)	(2,321)	(1,111)



Как видим из сравнения таблиц 1 и 2, можно не использовать слои d_5 , d_6 , так как значения максимумов и минимумов на этих слоях в КВ-диапазоне практически не попадают и к тому же с высокой степенью точности кратны тем, что возникают на других слоях. Для каждой длины волны найдется хотя бы один слой, не образующий интерференционного минимума. Поэтому, пожертвовав приемом в районе 30 МГц (т.е. отбрасывая слои d_5 и d_6), который в реальных условиях используется крайне редко из-за превышения максимально применимой частоты на КВ-радиотрассе, получим приближенно структуру диэлектрического слоя, показанную на рисунке 4.

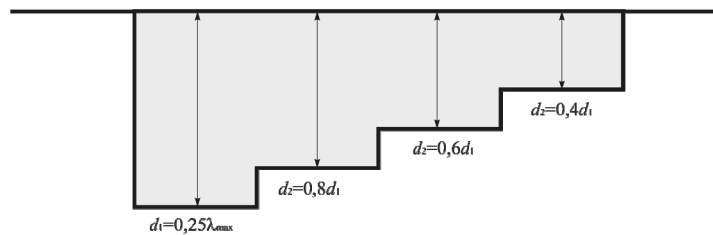


Рис. 4. Структура диэлектрического слоя

Применение диэлектрического слоя данной структуры с высоким показателем преломления n позволяет строить интегрированные антенны на поверхности несущих конструкций судов и самолетов, кроме того, при достаточно низкой стоимости диэлектрического материала возможно использование его и в автомобильной технике или даже в диапазоне УКВ (например, для размещения базовых станций мобильной связи на поверхности железобетонных стен домов и т.д.).

Список литературы

1. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. М., 1997.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., 1984.
3. Мышкис А.Д. Лекции по высшей математике : учеб. пособие. 5-е изд., перераб. и доп. СПб., 2007.
4. Трофимова Т.И. Курс физики : учеб. пособие для вузов. 6-е изд., стереотип. М., 1999.
5. Угаров М.П. Теория электромагнитного поля : учеб. пособие. Петродворец, 1975.
6. Математическое программное обеспечение и исследования : [официальный сайт компании Tvalx]. URL: <http://www.tvalx.com/Russian/products/ScientificCalculatorPrecision90/> (дата обращения: 24.01.2013).

Об авторах

Виктор Ефимович Пониматкин — канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Алексей Алексеевич Типикин — адъюнкт, Военно-морская академия (филиал), Калининград.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru



Андрей Алексеевич Шпилевой — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru

About authors

Viktor Ponimatkin — PhD, senior research fellow, ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Aleksey Tipikin — PhD student, MESC MMF «VMF», Kaliningrad.

E-mail: VPonimatkin@kantiana.ru

Andrey Shpilevoy — PhD, ass. prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: AShpilevoi@kantiana.ru