



**5-й Международный
радиоэлектронный форум
«Прикладная радиоэлектроника.
Состояние и перспективы
развития»**

МРФ–2014

Том 1

КОНФЕРЕНЦИЯ

**«ИНТЕГРИРОВАННЫЕ
ИНФОРМАЦИОННЫЕ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ
СИСТЕМЫ
И ТЕХНОЛОГИИ»**

Украина, г. Харьков, 2014

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ (ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ)

Дорошенко В.А., Стрельницкий А.Е., Стрельницкий А.А.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина, каф. Высшей математики, тел. (057) 702-13-35,
E-mail: alex.streknytskyi@gmail.com; vlad_a.doroshenko@mail.ru

The results of theoretical and experimental studies of the model problem of excitation of a conical antenna with a slot cut along its ruling from the cone tip are presented. The theoretical results for the spatial field distribution by virtue of the derived rigorous solution of the boundary electromagnetic problem for a cone with a longitudinal slot are obtained. The experimental results of measurements of the cone antenna radiation pattern are given.

Введение

Изучение свойств конических структур и их производных представляет интерес для различных физических приложений и, в частности, в радиоэлектронике. Поэтому исследование модельных электродинамических задач для конусов, биконусов, конических и плоских угловых секторов может быть эффективно использовано при проектировании и создании широкополосных и сверхширокополосных антенн, а также узлов и элементов сложных современных радиоэлектронных устройств. Успех от применения результатов этих исследований зависит также и от уровня адекватности используемых физических и математических моделей рассматриваемым в задачах физическим процессам. В данной работе приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований модельной задачи взаимодействия щелевой полупрозрачной конической поверхности с электромагнитным полем. Важными частными случаями такой структуры является конус с продольной щелью, конический и плоский угловой секторы. Насколько можно судить по информации из доступных литературных источников, подобная модельная задача другими исследователями не рассматривалась.

1. Математическая модель задачи возбуждения точечным источником конуса с продольной щелью

1.1. Постановка задачи и метод решения. Полубесконечный круговой полупрозрачный конус Σ (параметр прозрачности $W > 0$) с продольной щелью, прорезанной вдоль образующей конуса от его вершины, находится в поле монохроматического радиального электрического ($\chi = 1$) или магнитного диполя ($\chi = 2$) с единичным моментом и размещённого в точке $B_0(\vec{r}_0)$ на оси конуса. Ширина щели d – величина двугранного угла, образованного плоскостями, проходящими через ось конуса и кромки щели. Во введённой сферической системе координат r, θ, φ конус определяется уравнением $\theta = \gamma$.

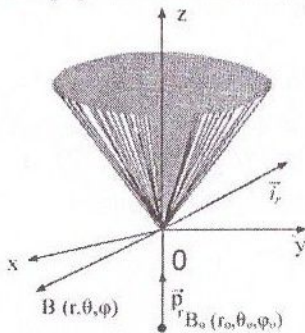


Рис. 1. Конус с одной щелью

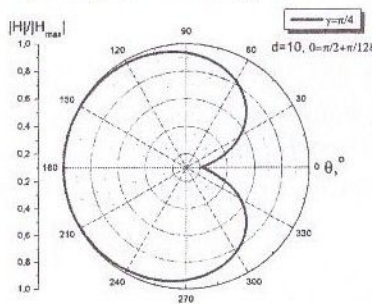


Рис. 2. Диаграмма пространственного распределения поля для конуса с продольной щелью, $d = 10^\circ, \gamma = \pi/4$

Электродинамическая задача заключается в нахождении электромагнитного полного поля \vec{E} , \vec{H} в присутствии конуса и точечного источника, которое удовлетворяет однородным уравнениям Максвелла, краевому условию на полупрозрачной конической поверхности, условию на бесконечности и условию ограниченности энергии. Поставленная в такой постановке краевая электродинамическая задача имеет единственное решение. Учитывая тот факт, что составляющие поля могут быть выражены через скалярный потенциал Дебая V [1], исходную электродинамическую краевую задачу можно свести к краевой задаче математической физики относительно потенциала полного поля, который удовлетворяет всюду вне конуса и источника однородному уравнению Гельмгольца, принципу предельного поглощения, условию ограниченности энергии, а на поверхности конуса – краевым условиям:

$$\left. \frac{\partial \chi^{-1}}{\partial n \chi^{-1}} V(\chi) \right|_{\Sigma} - 4^{1-\chi} (rW(\chi) \sin \gamma) \tilde{\rho}(\chi) \left[\frac{\partial^{2-\chi}}{\partial n^{2-\chi}} V(\chi) \right] \Big|_{\Sigma} = 0, \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial \chi^{-1}}{\partial n \chi^{-1}} V(\chi) \right] \Big|_{\Sigma} = 0, [v] \Big|_{\Sigma} = (v^+ - v^-) \Big|_{\Sigma}, \quad (2)$$

где \vec{n} – внешняя нормаль к поверхности конуса Σ , $V^{\pm} = V(\chi) \Big|_{\theta=\gamma \pm 0}$, $\tilde{\rho} = (-1)^{\chi-1}$.

Смешанная краевая задача в такой постановке имеет единственное решение, которое представим в виде:

$$V(\chi) = V_0 + V_1(\chi),$$

где $V_0 = \frac{e^{-qr}}{4\pi r_0 R}$ – потенциал Дебая источника в свободном пространстве, $R = |\vec{r} - \vec{r}_0|$, а $V_1(\chi)$ – потенциал, соответствующий полю, обусловленному присутствием конуса. Для нахождения неизвестного потенциала $V_1(\chi)$ используем аппарат интегральных преобразований Конторовича-Лебедева [2]:

$$\hat{v}(\tau) = \int_0^{+\infty} v(r) \frac{K_{i\tau}(qr)}{\sqrt{r}} dr, v(r) = \frac{2}{\pi^2} \int_0^{+\infty} \tau \operatorname{sh} \pi \tau \hat{v}(\tau) \frac{K_{i\tau}(qr)}{\sqrt{r}} dr.$$

где $K_{i\tau}(qr)$ – функция Макдональда, $q = iak$, k – волновое число в однородной среде, в которую помещён конус и источник. Ищем потенциал $V_1(\chi)$ в виде

$$V_1(\chi) = \frac{1}{2\pi^2} \int_0^{\infty} \tau \operatorname{th} \pi \tau \frac{K_{i\tau}(qr_0)}{\sqrt{r_0}} \cdot \frac{K_{i\tau}(qr)}{\sqrt{r}} \cdot \frac{d\chi^{-1}}{d\gamma \chi^{-1}} P_{-1/2+i\tau}(\cos \gamma) \hat{V}_{i\tau}(\chi)(\theta, \varphi) d\tau \quad (3)$$

$$\text{где } \hat{V}_{i\tau}(\theta, \varphi) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_n(\chi) \frac{P_{-1/2+i\tau}^n(\pm \cos \theta)}{d\chi^{-1}} e^{in\varphi}. \quad (4)$$

Знак «+» в (4) соответствует области $0 < \theta < \gamma$, а «-» – области $\gamma < \theta < \pi$, $x_n(\chi)$ – неизвестные коэффициенты, для которых получаем следующие функциональные (парные сумматорные) уравнения в результате использования краевых условий (1), (2), а также условия непрерывности потенциала $V_1(\chi)$ (3) и его частных производных в щели:

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ 1 + 2^{3-2\chi} (W(\chi))^{\tilde{\rho}(\chi)} (n+v) \frac{\tilde{\rho}(\chi) |n|}{n} (1 - \varepsilon_n(\chi)) \right\} x_n(\chi) e^{in\varphi} = 1, \text{ конус}; \quad (5)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} (n+v) \frac{\tilde{\rho}(\chi) |n|}{n} (1 - \varepsilon_n(\chi)) x_n(\chi) e^{in\varphi} = 0, \text{ щель}; \quad (6)$$

где $\Gamma(z)$ – гамма-функция, а $P_{-1/2+it}^{nN}(\cos\theta)$ – присоединённые функции Лежандра 1-го рода, $\varepsilon_n^{(x)}$ известные коэффициенты. Решение парных сумматорных (коэффициенты $x_n^{(x)}$) уравнений находится в энергетическом гильбертовом пространстве l^2 с весом в силу условия ограниченности энергии. Решение парных сумматорных уравнений (5), (6) из-за их неустойчивости найти весьма проблематично, в связи с чем целесообразно преобразовать (5), (6) к системе линейных алгебраических уравнений, матричный вид которой такой

$$X = AX + D, \quad (7)$$

где матричный оператор A является вполне непрерывным и ограниченным в рассматриваемом пространстве решений, что даёт возможность применить для нахождения коэффициентов $x_n^{(x)}$ метод редукции и получить численное решение задачи при её произвольных параметрах. Следует отметить, что в случае узкой щели или узкого конического сектора матричный оператор системы (7) является сжимающим, что позволяет получить аналитическое решение задачи и провести качественный анализ электродинамических характеристик незамкнутого полупрозрачного конуса.

1.2. Численное решение. Диаграммы пространственного распределения поля в пространстве. В случае возбуждения конуса магнитным радиальным диполем решение системы (7) найдено численно методом редукции. Диаграмма пространственного распределения поля, полученного при осесимметричном возбуждении полупрозрачного сплошного конуса, является круговой. Наличие продольной щели существенно меняет форму диаграммы, которая приобретает форму кардиоиды, представляющей практический интерес (рис. 2).

2. Экспериментальное исследование электродинамических свойств щелевого конуса

Для изучения влияния щели проведены экспериментальные исследования диаграмм направленности сплошного конуса и конуса с продольной щелью. В качестве источника возбуждения сплошной, металлической антенны используется плоский кольцевой магнитный ток, достаточно хорошо моделирующий возбуждение полубесконечного штыря (которому соответствует коническая антенна с образующей конуса $> 3\lambda$), расположенного на заземленной плоскости, коаксиальной линией. Так как плоский кольцевой магнитный ток хорошо воспроизводит реальный участок возбуждения, эта модель позволяет с хорошей точностью рассчитать входной импеданс антенны [3].

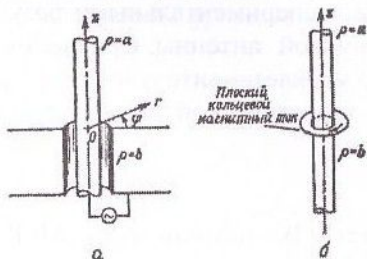


Рис. 3. Возбуждение штыря на заземленной плоскости коаксиальной линией (а) и физическая модель антенны (б)

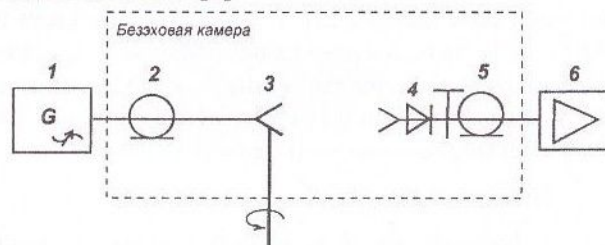


Рис. 4. Структурная схема измерения ДН конусной антенны: 1 - Генератор СВЧ. 2 - Соединительный коаксиальный кабель. 3 - Конусная антенна на поворотном столе. 4 - Приемный рупор с детекторной секцией. 5 - Коаксиально-волноводный переход. 6 - Селективный усилитель

Экспериментальная установка по исследованию конусной антенны (образующая длиной 100 мм, угол при вершине 90° , угловая ширина щели 10°) представляет собой металлический экран с установленным на нем коаксиальным приборным разъемом, через который производится запитка антенны. Конусная антенна устанавливается над экраном

с помощью двух дополнительных деталей. Предложенная схема питания конической антенны несимметричным коаксиальным кабелем с использованием коаксиального приборного разъема позволяет оперативно менять исследуемые антенны (Рис.4). Экспериментальные исследования по измерению диаграммы направленности (ДН) конусной антенны проводились в безэховой камере.

На рис.5 дана ДН сплошного конуса, а влияние продольной щели на пространственное распределение поля можно оценить по ДН для конусной антенны с продольной щелью (рис.6), приведенной на рис.7.

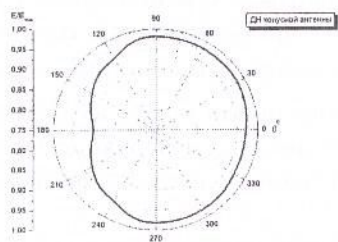


Рис. 5. Результаты измерений ДН конусной антенны

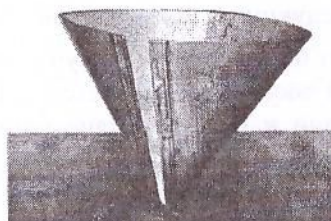


Рис. 6. Фото конусной антенны с продольной щелью над экранирующей поверхностью

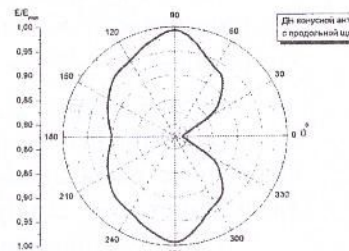


Рис. 7. Результаты измерений ДН конусной антенны с продольной щелью

Сравнение ДН, полученной экспериментальным путём для конусной антенны с продольной щелью (рис. 6, 7) с диаграммой пространственного распределения поля в случае осесимметричного возбуждения полубесконечного конуса с продольной щелью (рис.1,2) показало удовлетворительное совпадение результатов экспериментального измерения с расчётными, полученными на основе решения в строгой постановке краевой электродинамической задачи.

Заключение

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследований модельной задачи возбуждения конической антенны со щелью, прорезанной от вершины конуса вдоль его образующей. Проведено сравнения теоретических расчётов пространственного распределения поля на основе полученного строгого решения краевой электродинамической задачи для конуса с продольной щелью с экспериментальными результатами измерения диаграммы направленности щелевой конусной антенны. Сравнения теоретических и экспериментальных исследований показало удовлетворительное совпадение результатов, что свидетельствует об удачном выборе теоретической модели процесса возбуждения щелевой конической антенны.

Литература

1. Вайнштейн, Л.А. Электромагнитные волны. [Текст] / Вайнштейн Л.А. – М: Радио и связь, 1988. – 440 с.
2. Дорошенко, В.А. Дифракция электромагнитных волн на незамкнутых конических структурах. / Дорошенко В.А., Кравченко В.Ф. – М.: Физматлит, 2009. – 272 с.
3. Mittra, R. Computer techniques for electromagnetics. University of Illinois. Urbana Illinois, 2007, pp. 379-399.

Вовшин Б.М., Пушков А.А., Куликов К.В. УСТРАНЕНИЕ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ «ЗАПРЕДЕЛЬНЫХ» ДАЛЬНОСТЕЙ В МЕТЕОРАДИОЛОКАТОРАХ	71
Могила А.А., Хлопов Г.И. РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ И СКОРОСТИ С ПОМОЩЬЮ СТОХАСТИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ	73
Буйлов Е.Н., Горшков С.А., Седышев С.Ю., Воронцов М.Н. ВЕСОВАЯ ОБРАБОТКА ПСЕВДОХАОТИЧЕСКИХ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С ЛЧМ ДИСКРЕТАМИ	78
Карташов В.М., Бабкин С.И., Кушнир М.В. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ МЕТЕОВЕЛИЧИН РАДИОАКУСТИЧЕСКИМ ЗОНДИРОВАНИЕМ	82
Ткачева Т.А., Хлопов Г.И., Войтович О.А., Линкова А.М. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДНОСТИ ОБЛАКА ПО ДАННЫМ АКТИВНО-ПАССИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ.....	86
Леховицкий Д.И., Рачков Д.С., Семеняка А.В., Рябуха В.П., Катюшин Е.А. ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ ОТ МЕСТНЫХ ПРЕДМЕТОВ В ИМПУЛЬСНЫХ ДОПЛЕРОВСКИХ МЕТЕОЛОКАТОРАХ.....	90
Хлопов Г.И., Войтович О.А. ВЛИЯНИЕ ОСАДКОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ	97
Шама Е.А. УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА.....	101
Макаров А.Л., Мозговой Д.К., Хорошилов В.С., Попель В.М., Ольшевский А.Л., Балашов В.Н., Романюк А.Ф. ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ФИЛЬТРАЦИИ ПРИБОРНЫХ ПОМЕХ НА СНИМКАХ ОТ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СКАНЕРОВ	105
Купченко Л.Ф., Рыбьяк А.С. ДИНАМИЧЕСКАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ.....	109
Кожмякин Р.А., Рубель А.С., Абрамов С.К., Кривенко С.С., Лукин В.В. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА МНОГОМЕРНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЗ.....	113
Antyufeev V.I., Bykov V.N., Grichaniuk A.M., Ivanchenko D.D., Kolchigin N.N., Krayushkin V.A., Radzikhovskiy V.N., Sotnikov A.M., Berezhnaya T.D. MATRIX RADIOMETRIC IMAGING SYSTEMS.....	117
Доля Г.Н., Катунин А.Н., Надь О.А. ЛАЗЕРНАЯ СПЕКЛ-ВЕЛОСИМЕТРИЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ СО СВЕТОВОЗВРАЩАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	120
Ряполов И.Е., Сухаревский О.И., Василец В.А. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАЛЬНОСТНЫХ ПОРТРЕТОВ КРЫЛАТОЙ РАКЕТЫ CALCM.....	125
Разсказовский В.Б., Логвинов Ю.Ф. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИЛЛИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН ПРИ СЛАБОМ ВЕТРОВОМ ВОЛНЕНИИ	129
Дорошенко В.А., Стрельницкий А.Е., Стрельницкий А.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ (ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ)	133
Шандренко Р.В., Шкарлет А.И., Шернин М.А. МЕТОДЫ АКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ МЕТЕОРНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОТ ПОМЕХ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ	137
Черкас Ю.В. ОБРАБОТКА ДАННЫХ РАДИОЛОКАЦИИ И НАБЛЮДЕНИЙ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ	139
Мовсесян Я.С., Хламов С.В., Дихтяр Н.Ю. ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПЗС – КАДРАХ С ОБЪЕКТАМИ ЗВЕЗДНОГО КАТАЛОГА	143