

## Низкопрофильная антенна вытекающей волны с широкой диаграммой направленности на основе волновода, интегрированного в подложку

*Представлены результаты по расчету диаграммы направленности антенны вытекающей волны на основе интегрированного в подложку волновода и установленной в металлический корпус. Основным требованием было обеспечение широкой диаграммы направленности ( $\geq 80^\circ$  по уровню  $-7\text{дБ}$ ) в исследуемой полосе частот. Проведенная разработка, синтез и электродинамический анализ показали возможность выполнения поставленной цели на практике и большие перспективы расширения функциональных возможностей разработанной антенны.*

**Ключевые слова:** Антенна вытекающей волны, интегрированный в подложку волновод, диаграмма направленности, синтез.

Практическое использование бортовых антенных систем показало, что они могут в существенной степени влиять на радиолокационные и аэродинамические характеристики несущих объектов. Основными задачами при разработке антенн, являются их микроминиатюризация, повышение надежности, интеграция с другими устройствами и расширение функциональных возможностей.

Статья посвящена разработке антенны вытекающей волны на основе волноводов, интегрированных в подложку (Substrate Integrated Waveguide), которые представляют собой отдельный вид печатных СВЧ-линий передач. Интегрированные в подложку волноводы, изготавливаются в планарной форме при помощи технологии создания печатных плат и позволяют передавать полезный сигнал с малыми искажениями и потерями. Частотный диапазон таких структур в основном определяется так же, как и для классического прямоугольного волновода, но при этом поперечные размеры значительно меньше за счет электрофизических параметров подложки. Толщина определяется толщиной листа диэлектрической подложки.

$$\lambda_{кр} = 2 * a; \quad (1)$$

$$\lambda_{кр} = 2 * a_{equ}; \quad (2)$$

$$a_{equ} = a / \sqrt{\epsilon_r}; \quad (3)$$

$$W_{SIW} = a_{equ} + 2 * d. \quad (4)$$

Антенны вытекающей волны представляют собой единый массив нерезонансных поперечных щелей, которые близко расположены друг к другу и имеют малое сопротивление основной волне и как следствие малый уровень излучаемой мощности на отдельном элементе. Принцип работы антенн вытекающей волны базируется на излучении быстрых (вытекающих) волн, фазовая скорость которых выше скорости света. Отличительной особенностью таких антенн является то, что направление главного лепестка отклонено от нормали и зависит от постоянной распространения, частоты и длины

излучающей структуры, поэтому возможно осуществление частотного сканирования луча в определенном секторе пространства. Главное преимущество антенн вытекающей волны – это отсутствие дифракционных максимумов, малый уровень боковых лепестков, возможное обеспечение широкой полосы и относительная простота достижения высоких показателей коэффициента усиления. Они применимы в системах с наклонным излучением, предъявляющих требования к аэродинамике и конформности антенн, например: радиолокационных системах безопасности транспорта, системах навигации [2].

Поэтому, обладая относительно небольшими размерами и малым весом, антенны на основе интегрированных волноводов могут быть с успехом применены для решения радиолокационных задач. Используя все перечисленные преимущества, такие антенны можно с легкостью встраивать в корпуса летательных аппаратов, ракет, автомобилей и других объектов, фактически не влияя на их масса-габаритные, аэродинамические, радиолокационные и другие характеристики.

Для решения задачи получения диаграммы направленности с большой шириной по уровню  $-7$  дБ ( $\geq 80^\circ$ ) в полосе частот  $7 - 10$  ГГц, представим антенну эквивалентной антенной решеткой, состоящей из точечных излучателей (Рис.1).

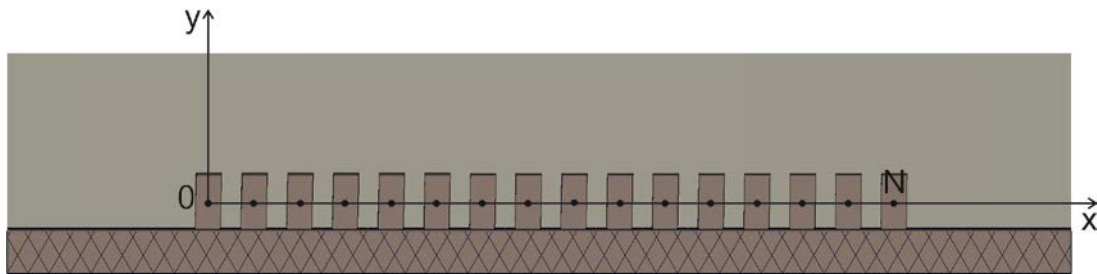


Рис. 1. Расположение нерезонансных щелей и эквивалентных точечных излучателей

Центр щели будем считать местом расположения точечного излучателя. У такой эквивалентной антенной решетки диаграмма направленности согласно [1] будет определяться уравнением 5:

$$F(\theta, \varphi) = F_N(\theta, \varphi) * f(\theta, \varphi); \quad (5)$$

где  $F_N(\theta, \varphi)$  – множитель антенной решетки,  
 $f(\theta, \varphi)$  – диаграмма направленности одиночного излучателя

$$F_N(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N A_n * e^{-i(\Phi + \Phi_0)}; \quad (6)$$

В первом приближении мы можем считать известным АФР подаваемое на излучатели, известным по результатам предварительного электродинамического моделирования антенны.

Аппроксимируя экспериментальные данные полиномами вида (7) и (8) зададим их в алгоритм проведения синтеза диаграммы направленности.

$$A = p_1 * x^6 + p_2 * x^5 + p_3 * x^4 + p_4 * x^3 + p_5 * x^2 + p_6 * x + p_7; \quad (7)$$

$$\Phi = c_1 * x + c_2. \quad (8)$$

В качестве переменных возьмем количество излучающих элементов  $N$  и расстояние между ними  $dx$ . После проведения расчетов для нашей задачи были получены следующие значения  $N=16$ ,  $dx=0,9$  мм.

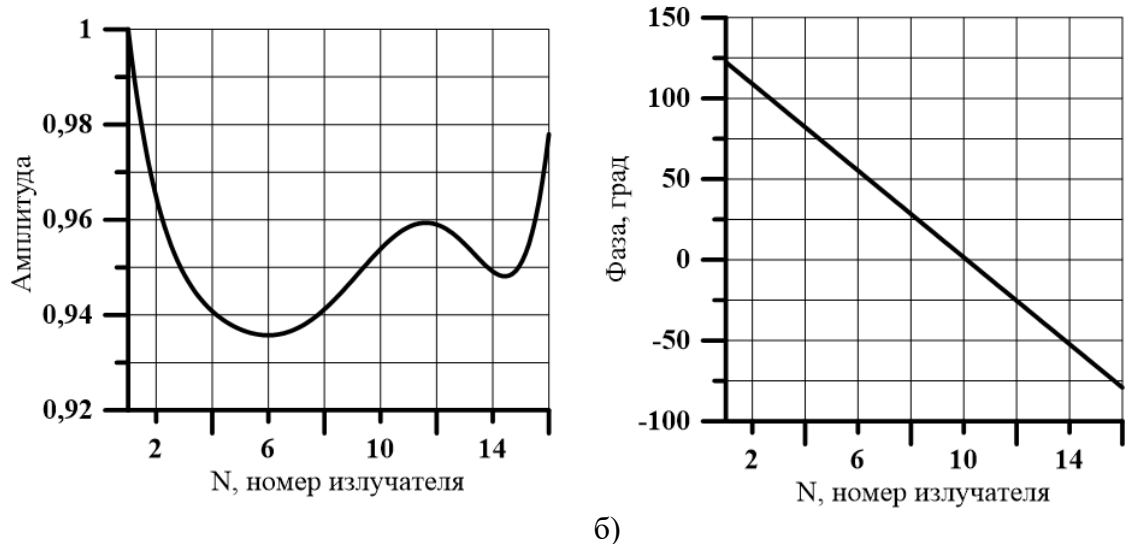


Рис. 2. Функции распределения амплитуды и фазы электромагнитного поля в антенне вытекающей волны

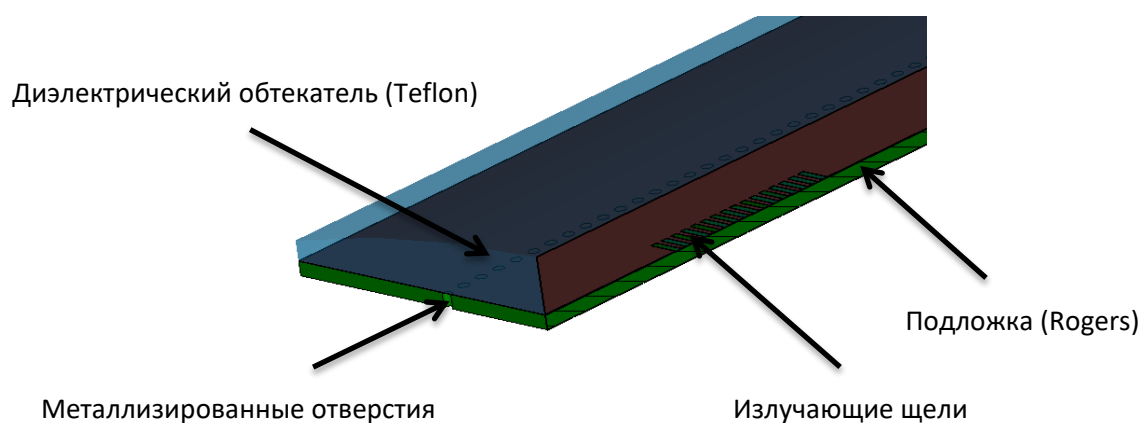


Рис.3 Конструкция антенны вытекающей волны с диэлектрическим обтекателем

Результаты электродинамического моделирования показали, что при полученном отношении количество излучателей/расстояние между излучателями получается наиболее широкая ДН в полосе частот.

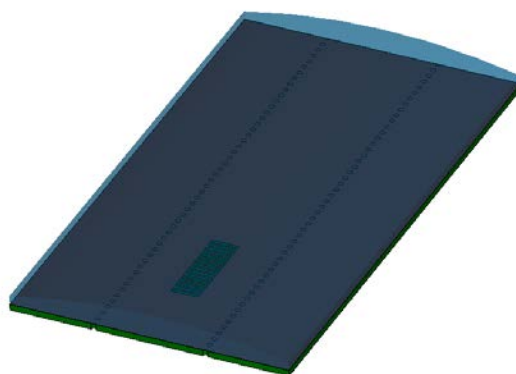


Рис. 4. Общий вид антенны вытекающей волны

Далее представлены графики математического расчета и электродинамического эксперимента (Рис. 5 и 6)

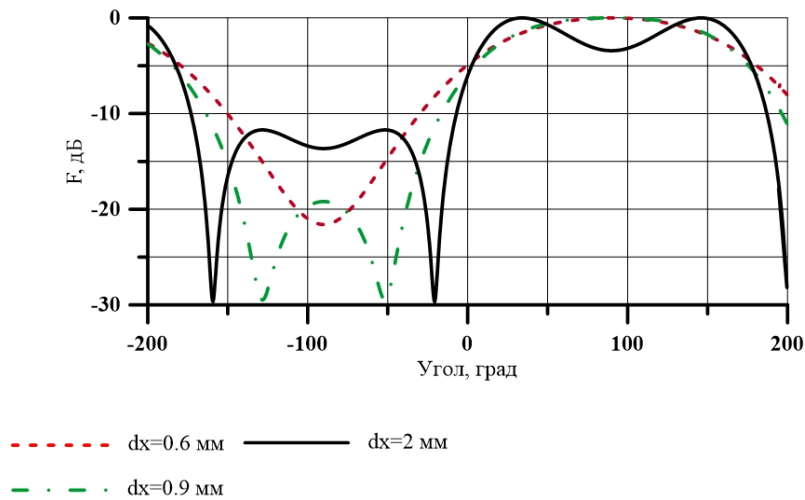


Рис.5. Результаты синтеза диаграммы направленности для антенны вытекающей волны

**F (θ), дБ**

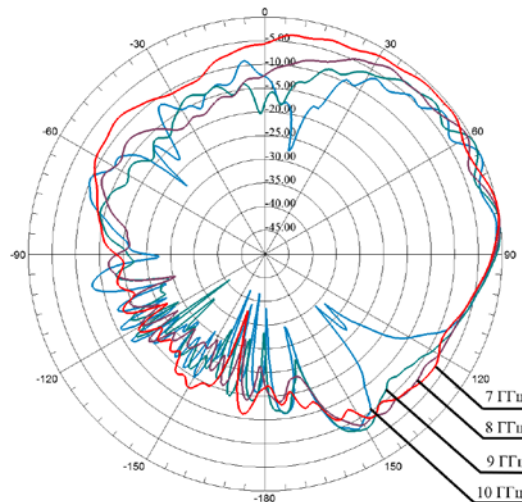


Рис.6. Изменение ширины диаграммы направленности антенны вытекающей волны в исследуемой полосе частот в плоскости E

Влияние защитного диэлектрического слоя расположенного на поверхности антенны на полевые и частотные характеристики не столь велико по сравнению с влиянием внутреннего заполнения, однако позволяет осуществлять более точную настройку антенны для работы в заданной полосе частот.

Проведенная разработка, синтез и электродинамический анализ показали возможность выполнения поставленной цели на практике и большие перспективы расширения функциональных возможностей разработанной антенны. Антенна вытекающей волны имеет широкую частотную полосу, компактные размеры, малый вес, относится к классу низкопрофильных встраиваемых антенн, более технологична в производстве, не требует настройки и имеет возможность работы на круговой поляризации.

Библиографический список

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток/ Под ред. Д.И. Воскресенского. - М. Радиотехника, 2012.
2. Дементьев А.Н., Козловский И.Б., Колесников С.М., Абышев С.В., Романов А.А. Антенна вытекающей волны на основе интегрированного волновода на подложке с поперечными щелями; Материалы международной научно-технической конференции. Москва. 2015. С.250-255.
3. Rumsey V.H. Traveling wave slot antennas. J. Appl. Phys. -1953 v.24. – P.1358-1365.
4. Yan L., Hong W., Wu K., Cui T.J. Investigations on the propagation characteristics of the substrate integrated waveguide based on the method of lines. Proc. Inst. Elect. Eng. Microwave antennas propagation, 2005. – P 35-42.
5. K.V. Lemberg, O.A. Nazarov, V.S. Panko, Yu.P. Salomatov High gain Ku-band substrate integrated waveguide slot antenna array. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2015. – P. 319-323.