

ПОСТРОЕНИЕ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ПЕЧАТНЫХ ВОЛНОВОДОВ

**А. С. Колмыкова, О. А. Белоусов,
Р. Ю. Колмыков, А. И. Дякин**

*ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия;
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия имени профессора
Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия*

Рецензент д-р техн. наук, профессор А. В. Иванов

Ключевые слова: волновод; заземленный копланарный волновод; печатный волновод; сверхширокополосный излучатель с экспоненциальным раскрытием.

Аннотация: Рассмотрены особенности проектирования интегрированных печатных волноводов для построения сверхширокополосных излучателей с экспоненциальным раскрытием щели. Приведены основные аналитические выражения и виды волноводных переходов, реализующие технологию интегрированного печатного волновода и заземленного копланарный волновода в СВЧ-диапазоне.

В настоящее время большой интерес представляет разработка излучателей с высокими электродинамическими характеристиками работающих в широкой полосе частот, компактными размерами и хорошей повторяемостью. Это представляет интерес как для систем беспроводного широкополосного доступа, так и систем спутниковой связи. Одним из подходов для решения поставленной задачи является применение сверхширокополосных излучателей с экспоненциальным расширением щели, использующих технологию интегрированного печатного волновода SIW (Substrate Integrated Waveguide).

Колмыкова Анастасия Сергеевна – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; Белоусов Олег Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», e-mail: jjour314@gmail.com, ТамбГТУ, г. Тамбов, Россия; Колмыков Роман Юрьевич – младший научный сотрудник, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», г. Воронеж, Россия; Дякин Александр Игоревич – студент, ТамбГТУ, г. Тамбов, Россия.

Концепция технологии «печатного волновода» впервые предложена в 1994 году [1, 2]. Данная технология позволяет реализовать волновод на подложке и обеспечивает простой способ интеграции волновода на СВЧ и миллиметровых волнах планарных схем с использованием обычной недорогой печатной технологии.

На рисунке 1 представлен пример SIW, боковые стенки которого изготовлены с отверстиями, а не сплошными, которые используются в обычных металлических волноводах. Применение такого типа SIW позволяет разработать конструкцию более технологичной и с меньшими массогабаритными показателями по сравнению с металлическим при сохранении основных электродинамических характеристик и реализовать сверхширокополосные излучатели, не уступающие по параметрам излучателям, выполненным из металла, а иногда даже и превосходящие их.

Сверхширокополосные антенны являются классом широкополосных антенн с значительно широкими полосами пропускания [1, 3]. Антенна, у которой минимальная рабочая частота равна f_L и максимальная рабочая частота f_H , может быть классифицирована в качестве сверхширокополосной антенны, если

$$F_{BW} = 2 \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} > 0,2 \quad \text{или} \quad BW = f_H - f_L > 500 \text{ МГц},$$

где F_{BW} – относительная ширина полосы частот пропускания антенны; BW – полоса пропускания.

По сравнению с обычными узкополосными системами, проектирование антенн для сверхширокополосных систем является сложной задачей. Поэтому существуют компромиссы, как правило, между широкой полосой пропускания, компактным размером, низкой стоимостью, высокой эффективностью излучения и минимальной дисперсией. К такому типу антенн можно отнести излучатели Вивальди.

Антенна Вивальди (АВ) принадлежит к классу TSA (Tapered Slot Antenna – антенна с расширяющейся щелью) и имеет хорошие электродинамические показатели для широкого диапазона рабочих частот [1, 4, 5].

Антенна Вивальди идеально подходит для применения в сверхширокополосных антенных системах из-за высокого коэффициента усиления, простого дизайна, узкой ширины луча в плоскости E , относительно широкой рабочей полосы частот и не требует широких поперечных размеров при производстве [4, 6, 7].

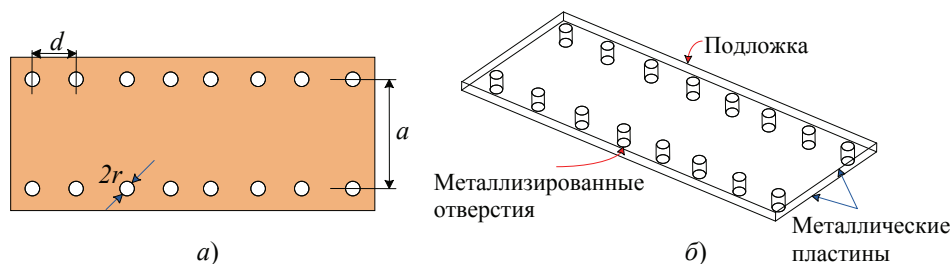


Рис. 1. Интегрированный волновод на диэлектрической подложке: а – вид сверху; б – 3D-вид

Основные аналитические выражения для нахождения компоненты электрического поля в соответствующих плоскостях имеют вид:

$$E_{\theta}^i(\theta) = E_a^i(k_0 W^i \cos \theta) \sqrt{\frac{2}{\sin \theta}} \left[e^{-jk_0 c^i L} \left\{ \frac{F(u_h^i) - F(u_l^i)}{\sqrt{c^i - \cos \theta}} \right\} + \right. \\ \left. + \Gamma e^{jk_0 c^i L} \left\{ \frac{F(\bar{u}_h^i) - F(\bar{u}_l^i)}{\sqrt{c^i + \sin \theta}} \right\} \right];$$

где W^i – ширина i -го участка; Γ – гамма-функция; x_l^i и x_h^i – нижняя и верхняя координаты i -го участка; $F(\bullet)$ – интеграл Френеля, определяемый из соотношения

$$F(v) = \int_0^v \frac{e^{-jt}}{\sqrt{2\pi t}} dt;$$

$e^{-jk_0 c^i L}$ – множитель, характеризующий набег фазы, L – длина щели. Множителем $E_a^i(\bullet)$ является функция вида

$$E_a^i(\bullet) = \sqrt{Z_0^i} J_0(\bullet),$$

где J_0 – функция Бесселя; Z_0^i – сопротивление i -го участка, определяемое из соотношения

$$Z_0^i = 60 + 3,69 \sin \left(\frac{(\varepsilon_r - 2,22)}{2} \cdot 36 \right) + 135,5 \ln(10\varepsilon_r) \sqrt{\frac{W^i}{\lambda_0}} + \\ + 2,81 \left(1 - 0,011\varepsilon_r (4,48 + \ln(\varepsilon_r)) \right) \left(\frac{W^i}{d} \right) \ln \left(\frac{100d}{\lambda_0} \right) + 131,1 (1,028 - \ln(\varepsilon_r)) \sqrt{\frac{d}{\lambda_0}} + \\ + \frac{12,48 \left(1 + 0,18 \ln(\varepsilon_r) \left(\frac{W^i}{d} \right) \right)}{\sqrt{\varepsilon_r - 2,06 + 0,85 \left(\frac{W^i}{d} \right)^2}},$$

где ε_r – диэлектрическая проницаемость материала подложки; λ_0 – длина волны в пределах начального регулярного участка антенны; d – толщина диэлектрической подложки.

Остальные составляющие рассчитываются по формулам:

$$c^i = (\lambda_0/\lambda^i)_i; \quad k_0 = 2\pi/\lambda_0; \\ u_{h,l}^i = k_0 x_{h,l}^i (c^i - \sin \theta); \quad \bar{u}_{h,l}^i = k_0 x_{h,l}^i (c^i + \sin \theta); \\ v_{h,l}^i = k_0 x_{h,l}^i (c^i + \cos \varphi); \quad \bar{v}_{h,l}^i = k_0 x_{h,l}^i (c^i - \cos \varphi);$$

$$q_{h,l}^i = k_0 x_{h,l}^i (c^i - 1); \quad \bar{q}_{h,l}^i = k_0 x_{h,l}^i (c^i + 1);$$

$$p_{h,l}^i = k_0 x_{h,l}^i (1 + \cos \varphi),$$

где λ' – длина волны в пределах i -го регулярного участка антенны.

При питании (возбуждении) такого типа излучателя возможны большие потери сигнала. Для компенсации данного явления предлагается использовать технологию «печатного волновода» или интегрированного в подложку волновода SIW, представляющего собой линию передачи, созданную двумя рядами металлических межслойных переходов, которые обеспечивают электрическое соединение двух параллельных металлических пластин, ограничивающих диэлектрическую подложку [8, 9]. Для исключения возбуждения такого волновода на более высоких частотах за счет увеличения толщины подложки будем использовать заземленный копланарный волновод GCPW (Grounded Coplanar Waveguide). Примеры таких переходов представлены на рис. 2 (трехмерные модели и графики).

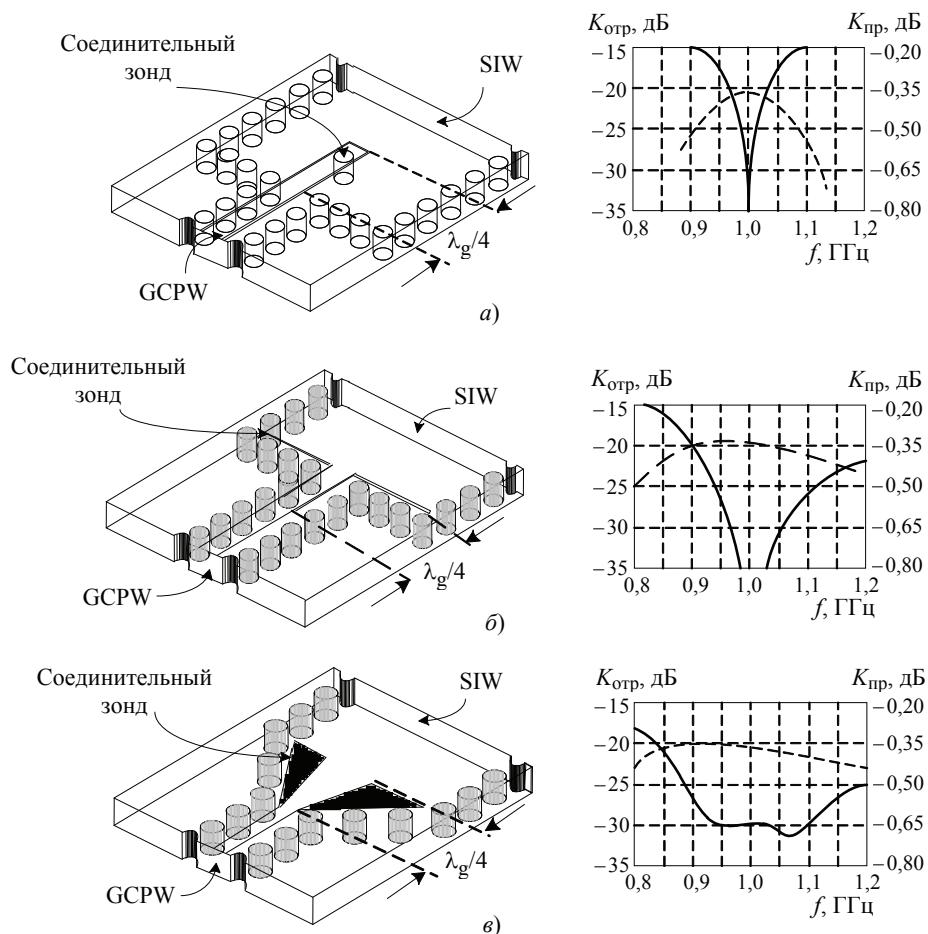


Рис. 2. Переходы GCPW на SIW:

a – токовый зонд; *b* – магнитный дипольный паз; *в* – треугольная муфта;
 — — — — коэффициент отражения $K_{отр}$; — — — — коэффициент передачи $K_{пр}$

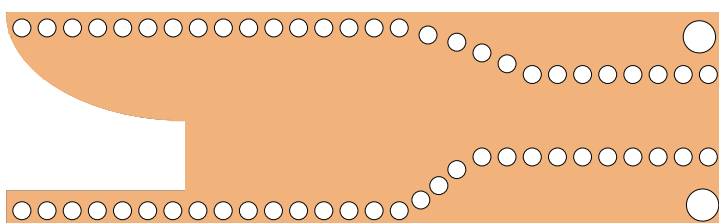


Рис. 3. Общий вид антенны Вивальди

Как показано на рис. 2, *а*, металлизированное сквозное отверстие расположено в соединении, чтобы обеспечить возбуждение соединительного зонда. Для того чтобы передать полную мощность, в GCPW необходимо осуществить питание по открытой схеме рядом с соединительным зондом, где ток, текущий через зонд, генерирует магнитное поле, которое имеет аналогичное распределение, что и H -поле режимов TE_{10} в SIW. Через отверстия, расположенные вдоль GCPW, осуществляется параллельный режим в SIW-линии [6, 8, 9].

В качестве альтернативы, как показано на рис. 2, *б*, предлагается переход копланарной линии с заземленным входом к SIW, с использованием E -поля. В данном случае соединительные щели имеют разрыв на верхней поверхности SIW, помещаются для предотвращения короткого замыкания на SIW и действуют как магнитный диполь с сильным E -полем через щель в центре, но слабее на ее конце [10].

Такое распределение соответствует распределению E -поля режима TE_{10} в SIW-структуре, и в этом случае может быть достигнут плавный переход.

Трансформация сопротивления в широком диапазоне частот представляет особую проблему, которую можно решить за счет интеграции соединительного отверстия и сопротивления трансформатора в одну сужающуюся соединительную щель, как показано на рис. 2, *в*, то есть боковые стенки SIW сужены в форме треугольника таким образом, что направление электрического поля в соединительной щели всегда перпендикулярно боковым стенкам SIW. Коническая соединительная щель также служит в качестве трансформатора сопротивления, чтобы обеспечить нормальную работу интегрированного волновода.

Результаты моделирования, приведенные на рис. 2, показывают значительное улучшение пропускной способности с предлагаемым треугольным раскрытием.

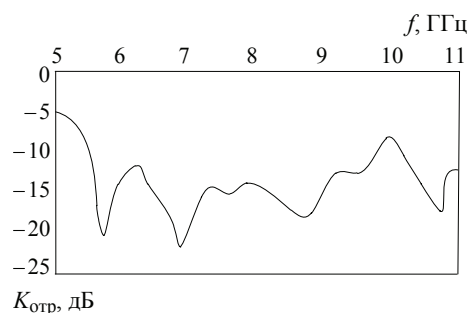


Рис. 4. Значения коэффициента отражения

Таким образом, применение данной технологии позволяет построить сверхширокополосные излучатели с экспоненциальными раскрытием щели, которые будут обладать вышеизложенными характеристиками. На рисунке 3 представлен общий вид антенны Вивальди, а измеренный коэффициент отражения данного излучателя приведен на рис. 4.

Особенность применения данных структур заключается в том, что они сохраняют основные преимущества классических волноводов: большую передаваемую мощность, малые потери, полностью экранированную структуру, высокую добротность резонаторов, но при этом приобретают черты планарных структур, а именно малые размеры и вес, низкую стоимость производства. Одно из главных преимуществ данной технологии – возможность интегрировать все компоненты на одной подложке, включая пассивные компоненты, активные элементы и даже антенны, что позволяет реализовывать разнообразные антенные структуры в печатном исполнении для различных частотных областей с сохранением основных электродинамических характеристик и масса-габаритных показателей. Данный аспект немаловажен при проектировании плоских антенных решеток как для систем наземной спутниковой связи, так и для систем беспроводного широкополосного доступа

Список литературы

1. Устройства СВЧ и антенны / Д. И. Воскресенский [и др.] ; под ред. Д. И. Воскресенского. – М. : Радиотехника, 2008. – 384 с.
2. Антенная решетка на основе широкополосной планарно-щелевой антенны с экспоненциальным изменением ширины щели для систем беспроводного широкополосного доступа / О. А. Белоусов [и др.] // *Вопр. соврем. науки и практики*. Университет им. В.И. Вернадского. – 2015. – № 2 (56). – С. 184 – 194. doi: 10.17277/voprosy.2015.02.pp.184-194
3. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневецкий [и др.]. – М. : Техносфера, 2005. – 592 с.
4. Виноградов, А. Ю. Устройства СВЧ и малогабаритные антенны : учеб. пособие для вузов / А. Ю. Виноградов, Р. В. Кабетов, А. М. Сомов ; под ред. А. М. Сомова. – М. : Горячая линия – Телеком, 2012. – 440 с.
5. Газизов, Т. Р. Широкополосная антенная решетка для абонентской станции «WiMic-6000» / Т. Р. Газизов, Е. В. Дмитриченко // *Инфокоммуникац. технологии*. – 2012. – Т. 10, № 1. – С. 66 – 69.
6. Фролов, А. А. Моделирование характеристик антенн СВЧ-диапазона / А. А. Фролов, С. В. Гирич, В. П. Заярный // *Изв. Волгоград. гос. техн. университета*. – 2008. – С. 112 – 114.
7. *Microstrip Antenna Design Handbook* / R. Garg [et al.]. – Artech House, 2000. – 845 с.
8. Gross, F. G. *Frontiers in Antennas: Next Generation Design & Engineering* / Frank B. Gross. – The McGraw-Hill Companies, 2011. – 526 p.
9. Janaswamy, R. Analysis of the Tapered Slot Antenna / R. Janaswamy, D. Schaubert // *IEEE Trans. AP*. – 1987. – V. 35. – P. 1058 – 1065.
10. Wang, Ya. Design of a Compact Tapered Slot Vivaldi Antenna Array for See Through Concrete Wall UWB Applications / Yazhou Wang, Aly E. Fathy. – Knoxville, USA : EECS Department, University of Tennessee, 2011. – 4 с.

References

1. Voskresenskii D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. *Ustroistva SVCh i anteny* [Microwave and antenna devices], Moscow: Radiotekhnika, 2008, 384 p. (In Russ.)
2. Belousov O.A., Kurnosov R.Yu., Gorshkov P.A., Ryazanova A.G. [Antenna Array for Broadband Planar Slot Antenna with an Exponential Change in the Slot Width for Broadband Wireless Access Systems], *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki*.

Universitet im. V.I. Vernadskogo [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2015, no. 2 (56), pp. 184-1946, doi: 10.17277/voprosy.2015.02. pp.184-194 (In Russ., abstract in Eng.)

3. Vishnevskii V.M., Lyakhov A.I., Portnoi S.L., Shakhnovich I.V. *Shirokopolosnye besprovodnye seti peredachi informatsii* [Broadband wireless communication networks], Moscow: Tekhnosfera, 2005, 592 p. (In Russ.)

4. Vinogradov A.Yu., Kabetov R.V., Somov A.M. *Ustoroistva SVCh i malogabaritnye anteny* [Microwave devices and small antennas], Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2012, 440 p. (In Russ.)

5. Gazizov T.R., Dmitrichenko E.V. [Broadband antenna array for WiMic-6000 subscriber station], *Infokommunikatsionnye tekhnologii* [Infocommunication technologies], vol. 10, no. 1, 2012, pp. 66-69.

6. Frolov A.A., Girich S.V., Zayarnyi V.P. [Modeling the characteristics of microwave antennas], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [News of Volgograd State Technical University], 2008, no. 4, pp. 112-114. (In Russ.)

7. Garg R., Bhartia P., Bahl I., Ittipiboon A. *Microstrip antenna design handbook*, Artech House, 2000, 845 p.

8. Gross Frank B. *Frontiers in antennas: next generation design & engineering*, The McGraw-Hill Companies, 2011, 526 p.

9. Janaswamy R., Schaubert D. Analysis of the tapered slot antenna, *IEEE Trans. AP*, 1987, vol. 35, pp. 1058-1065.

10. Wang Yazhou, Fathy Aly E. *Design of a Compact Tapered Slot Vivaldi Antenna Array for See Through Concrete Wall UWB Applications*, EECS Department, University of Tennessee, Knoxville, USA, 2011, 4 p.

Construction of Ultra-Wideband Emitters Using Integrated Printed Waveguides

**A. S. Kolmykova, O. A. Belousov,
R. Yu. Kolmykov, A. I. Dyakin**

*Tambov State Technical University, Tambov, Russia;
Zhukovsky-Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia*

Keywords: grounded coplanar waveguide; printed waveguide; ultra-wideband radiator with exponential opening; waveguide.

Abstract: In this paper, we consider the features of designing integrated printed waveguides for the construction of ultra-wideband emitters with exponential opening of the slit; the main analytical expressions and types of waveguide transitions realizing the technology of an integrated printed waveguide and a grounded coplanar waveguide in the microwave range are presented.

© А. С. Колмыкова, О. А. Белоусов,
Р. Ю. Колмыков, А. И. Дякин, 2017