

# Антенны и антенные решетки на основе ИПВ

**В.В. Демшевский, А.В. Парижанкова, И.А. Богачев**

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

**Аннотация:** в работе представлен обзор существующих разработок печатных антенн и антенных решеток на основе интегрированных в подложку волноводов, приведены их краткие характеристики, достоинства и недостатки.

**Ключевые слова:** интегрированный в подложку волновод, антенна, антенная решетка, микрополосковый вывод, коаксиальный вывод.

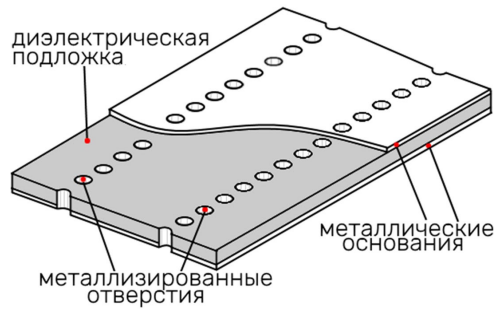
## 1. Введение

Развитие беспроводных систем связи, спутникового телерадиовещания, систем дистанционного зондирования Земли, бортовых систем радиолокации и навигации влечет за собой ужесточение требований к выходным характеристикам их составных частей. Основные ужесточения касаются массы, габаритов и электромагнитной совместимости. На практике часто получается так, что требования к блокам и устройствам, входящим в состав системы, оказываются противоречивыми и требуют компромиссного технического решения. В связи с чем встает вопрос либо более детальной проработки конструкции разрабатываемой системы, которая будет отвечать критериям компактности и устойчивости параметров в заданных условиях, либо поиска новых технических решений.

Традиционные технологические подходы к проектированию антенн и антенных решеток (АР), например, использование микрополосковых, копланарных, щелевых, часто приводят к возникновению паразитных взаимосвязей между отдельными элементами линий передачи и завышенному уровню потерь в платах СВЧ и распределительных системах, а применение классических прямоугольных волноводов ограничивает возможность уменьшения габаритов устройств. Поэтому в настоящее время находят применение конструкции антенн и АР, выполненных на основе интегрированного в подложку волновода (ИПВ) [1]. С момента появления ИПВ было проведено большое количество исследований по практической реализации антенн, АР и комплексов на их основе в различных частотных диапазонах. В представленной работе рассмотрен ряд зарубежных разработок антенн и АР на основе ИПВ, а также приведены результаты собственных теоретических и экспериментальных исследований в части использования ИПВ.

## 2. Интегрированный в подложку волновод

ИПВ представляют собой волноводоподобные элементы, созданные двумя рядами металлических цилиндров, расположенных в диэлектрической подложке и соединяющих два параллельных слоя металлизации. В результате, объемный классический прямоугольный волновод может быть изготовлен в планарной форме с применением существующих технологий производства печатных плат. При этом ИПВ – это закрытый тип линий СВЧ, сочетающий в себе свойства как классических волноводов (те же самые частотные и дисперсионные характеристики), так и микрополосковых линий (размеры, вес и стоимость изготовления). Внешний вид ИПВ приведен на Рисунке 1 [2].

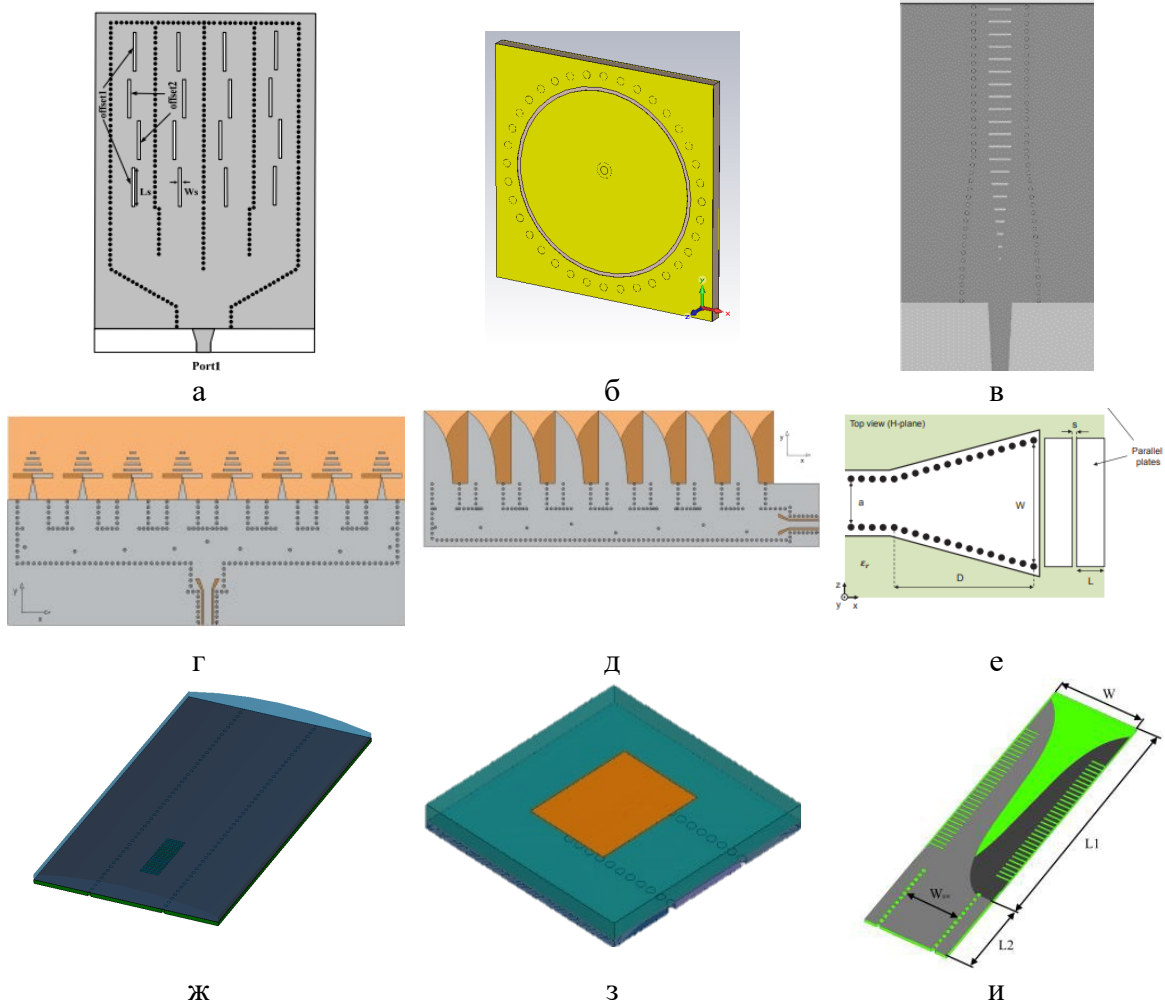


**Рисунок 1.** Внешний вид ИПВ

С появлением ИПВ, появился и еще один способ возбуждения электромагнитного поля в печатных антеннах и АР, а также совмещения их с распределительными системами СВЧ на одной печатной плате, изготовленной за один технологический цикл. Рассмотрим примеры антенн и АР на основе ИПВ.

### 3. Антенны и антенные решетки на основе ИПВ

Проведем краткий обзор основных существующих разработок антенн и АР на основе ИПВ, приведенных на Рисунке 2.



**Рисунок 2.** Антенны и антенные решетки на основе ИПВ

На Рисунке 2-а представлена волноводно-щелевая антенная решетка (ВЩАР) на основе ИПВ, подробное описание которой отражено в работе [3]. ВЩАР имеет ширину рабочей полосы частот более 10%, при КСВн равному 2 и максимальный КУ

равный 15 дБ, при этом намного более технологична и дешевле в изготовлении, чем ее прямой аналог на основе классических прямоугольных волноводов. Рассмотренная ВЩАР работает в К-диапазоне частот. Результаты аналогичных разработок ВЩАР рассмотрены также в публикациях [2,4,5].

На Рисунке 2-б приведен пример реализации микрополосковой патч-антенны на основе ИПВ, работающей в Х-диапазоне частот [6]. Антенна представляет собой топологию, имеющую 1 слой диэлектрика, на одной стороне которого расположен слой металлизации, выполняющий роль земли, а на другой стороне расположен патч круглой формы, отделенный щелью в металлизации от внешнего заземленного слоя металлизации. Возбуждение электромагнитной волны в этом случае осуществляется при помощи коаксиального кабеля. Представленная патч-антенна имеет ширину рабочей полосы около 3% и КУ 8-10 дБ на центральной частоте. Результаты аналогичных разработок патч-антенн и антенных решеток приведены в публикациях [7,8,9].

На Рисунке 2-в приведен пример антенны вытекающей волны (АВВ) на основе ИПВ, представляющей собой отдельный тип ВЩАР [10]. Представленная АВВ имеет ширину рабочей полосы 20% и КУ имеющий значение от 8.5 до 14 дБ в зависимости от рабочей частоты в Х-диапазоне. Представленная АВВ имеет микрополосковые выводы. Рассмотренная АВВ на основе ИПВ, как и ВЩАР на основе ИПВ более технологична и дешевле в изготовлении, чем ее прямой аналог на основе классических прямоугольных волноводов. Результаты аналогичных разработок АВВ на основе ИПВ приведены в публикациях [2,11,12].

На Рисунке 2-г приведен пример печатной вибраторной антенной решетки из антенн Уда-Яги, а с параллельным возбуждением на основе ИПВ [13]. Печатная антенная решетка работает в Ка-диапазоне частот, имеет ширину рабочей полосы 25% и КУ от 14 до 16.5 дБ. Особенностью антенной решетки является то, что делитель на основе ИПВ, благодаря своей структуре, одновременно параллельно делит сигнал на 8 направлений, что проблематично реализовать в микрополосковом исполнении. Результаты аналогичной разработки единичной антенны Уда-Яги на основе ИПВ приведены в публикациях [14,15].

На Рисунке 2-д приведен пример антенной решетки Вивальди с последовательным возбуждением на основе ИПВ [13]. Печатная антенная решетка работает в Ка-диапазоне частот, имеет ширину рабочей полосы 30% и КУ от 14.5 до 16.5 дБ. Особенностью антенной решетки является то, что делитель на основе ИПВ, благодаря своей структуре имеет возможность последовательного деления на 8 направлений при этом без паразитных эффектов, которые присущи микрополосковым линиям. Результаты разработок антенн Вивальди и антенных решеток на основе ИПВ приведены в публикациях [2,15,16].

На Рисунке 2-е приведен пример печатной рупорной антенны на основе ИПВ, работающей в Ки-диапазоне частот. В отличие от классического исполнения рупоров на основе прямоугольных волноводов, печатный рупор на основе ИПВ, помимо того, что имеет намного меньшие габариты, массу и цену изготовления, он также имеет большой набор вариаций по способам возбуждения, увеличения КУ и топологии самого раскрытия рупора. Представленный в работе [17] печатный рупор имеет ширину рабочей полосы 3-5% по уровню КСВн равному 2. Результаты разработок подобных рупорных антенн приведены в работах [2,18].

На Рисунках 2-ж-з-и приведены результаты наших собственных разработок, представленных в публикациях [19-25]. Вариант АВВ на основе ИПВ, приведенный на Рисунке 2-ж [19,20], отличается от аналогов тем, что имеет и сохраняет широкую ДН в полосе частот от 6 до 18 ГГц, при этом не требует дополнительной настройки в отличие от прямых аналогов на основе классического прямоугольного волновода.

Патч-антенна на Рисунке 2-3 с возбуждением на основе ИПВ, рассмотренная в работе [21,22], имеет КУ равный 7.8 дБ, который в свою очередь больше, чем у аналогов с коаксиальным, штыревым и микрополосковым возбуждением. При этом отсутствие потребности в применении СВЧ-соединителей позволит обеспечить лучшее согласование при разработке АР на их основе и создать более технологичную многослойную антенную решетку, интегрированную с распределительной системой и имеющую стабильное амплитудно-фазовое распределение. Патч-антенна с возбуждением на основе ИПВ имеет ширину рабочей полосы частот 10%, которая может быть расширена при изменении формы патча.

Антенна Вивальди на основе ИПВ, представленная на Рисунке 2-и [23,24,25], способна работать в диапазоне частот 18-42 ГГц и при этом имеет практически линейный рост КУ с 18 до 42 ГГц при увеличении рабочей частоты. Благодаря рифлению, которое находится на внешних краях металлизации, представленная антенна Вивальди легко встраивается в состав антенной решетки без потери своих частотных характеристик и характеристик направленности.

### 3. Выводы

Таким образом, в работе были рассмотрены варианты реализации антенн и АР на основе ИПВ. Основным преимуществом такой реализации является технологичность и возможность полной интеграции антенн с СВЧ-трактами без использования СВЧ-соединителей, что в свою очередь увеличивает как электрическую, так и механическую прочность. Немаловажным фактором является и уменьшение потерь при прохождении сигнала, особенно с увеличением частоты. Разработка антенн и АР на основе ИПВ является перспективным направлением для дальнейших исследований и создания высокотехнологичных бортовых систем.

#### Список литературы

1. Substrate Integrated Waveguide SIW Technology-based Miniaturization and Performance Enhancement of Antennas: A Review / Ayad Muslim Hamzah, Lukman Audah, Nasr Alkhafaji, Hayder Jawad Mohammed Albattat, Ali Abdulateef Abdulbari. International Journal of Advanced Science and Technology Vol. 29, No. 6, (2020), pp. 1739-1754.
2. Handbook of Antenna Technologies / Zhi Ning Chen, Duixian Liu, Hisamatsu Nakano, Xianming Qing, Thomas Zwick. Springer Reference, Business Media Singapore, 2016, pp. 1585-1656.
3. A Novel SIW Slot Antenna Array Based on Broadband Power Divider / Dongfang Guan, Zuping Qian, Member, IEEE, Yingsong Zhang, Member, IEEE, and Yang Cai. College of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, 2017.
4. Design of 45-degree Linearly Polarized Substrate Integrated Waveguide-fed Slot Array Antennas / Qingfeng Zhang, Yilong Lu. Springer Science. Int J Infrared Milli Waves, 2008.
5. Substrate Integrated Waveguide Antennas / Tarek Djerfafi, Ali Doghri, Ke Wu. Springer Reference, Business Media Singapore, 2015.
6. Microstrip SIW Patch Antenna Design for X band Application / Mehmet A. Belen, Filiz Gunes, Apler Galiskan. IEEE, 2016.
7. A DR Loaded Substrate Integrated Waveguide Antenna for 60 GHz High Speed Wireless Communication Systems / Nadeem Ashraf, Hamsakutty Vettikalladi, and Majeed A. S. Alkanhal. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation Volume, 2014.
8. Design of Substrate Integrated Waveguide to improve antenna performances for 5G mobile communication application / E. Sandi, A. Diamah, M W Iqbal, D.N. Fajriah. Journal of Physics: Conference Series, 4th Annual Applied Science and Engineering Conference, 2021.
9. Review of Substrate Integrated Waveguide Circuits for Beam-Forming Networks Working in X-Band / Giuseppe Venanzoni, Davide Mencarelli, Antonio Morini, Marco Farina, Francesco Prudenzeno. Applied Sciences, 2019.
10. Simulating a Beam Scanning Substrate Integrated Waveguide Leaky Wave Antenna in XFDTD. Electromagnetic Simulation Software, 2019.
11. Leaky Wave Antenna Design based on SIW Technology for Millimeter Wave Applications / Souad Doucha, Mehadji Abri, Hadjira Abri Badaoui. Wseas Transactions on Communications, 2015.

12. A novel reconfigurable CPW leaky-wave antenna for millimeter-wave application / Shaoqui Xiao, Bing-Zhong Wang, Xue-Song Yang, Gaofeng Wang. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 23, No. 11, November, 2002.
13. Design of a Compact Wideband Antenna Array for Microwave Imaging Applications / Jan Puskely, Tomas Mikulasek, Zbynek Raida. *RADIOENGINEERING*, VOL. 22, NO. 4, December 2013, pp. 1224-1232.
14. SIW-based Antennas for frequency band 71 to 76 GHz / Jan Velim, Petr Vasina, Zbynek Raida, Martin Janecka. *Elektrorevue*, Vol.5, No.2, June, 2014.
15. 10-GHz Antenna Array with substrate integrated waveguide planar feed network / Mehrdad Fojlaley, Salar Amirkabiri Razian, Babak Mohammadi, Javad Pourahmad Azar, Javad Nourinia. *International Journal of Technical Research and Applications* e-ISSN: 2320-8163, 2014. pp. 77-78.
16. Antipodal Vivaldi Antenna Arrays Fed by Substrate Integrated Waveguide Right-Angled Power Dividers / Sara Salem Hesari, Jens Bornemann. *Applied Sciences*, 2018.
17. A New Type of Printed Ku-Band SIW Horn Antenna with Enhanced Performances / M. Esquius-Morote, B. Fuchs, J.R. Mosing. *Proceedings of ISAP2012*, Nagoya, Japan, 2012.
18. SIW Based Wideband Horn Antenna / Dr. Amit Patel, Alpesh Vala, Riddhi Goswami, Keyur Mahant. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 225, 2017.
19. Разработка и электродинамический анализ СВЧ-плат на основе волновода, интегрированного в подложку / В.В. Демшевский, А.А. Цитович, М.С. Левашов. *Электронная техника. СВЧ-техника. Серия 1, научно-технический сборник, выпуск 3 (538) 2018*, с. 25-30.
20. Низкопрофильная антенна вытекающей волны с широкой диаграммой направленности на основе волновода, интегрированного в подложку / В.В. Демшевский, А.А. Цитович. *Электронная техника. СВЧ-техника. Серия 1, научно-технический сборник, выпуск 3 (538) 2018*, с. 31-35.
21. Влияние способа возбуждения на характеристики микрополосковой патч-антенны X-диапазона / В.В. Демшевский, И.А. Богачев. *VII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*, 2019 г.
22. Investigation of an UWB Antipodal Tapered Slot Antenna Element Based on Substrate Integrated Waveguide in an Antenna Array / Valeriy V. Demshevsky, Alexey A. Tsitovich, Igor A. Bogachev, Mikhail M. Migalin. *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EiConRus)*, 2020, pp. 1060-1064.
23. UWB Antenna Vivaldi Based on Substrate Integrated Waveguide / V.V. Demshevsky, M.M. Migalin, M.V. Papenyshev, M.S. Levashov. *2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, Divnomorskoe, Russia, 2019.
24. Антенная решетка на основе интегрированного в подложку волновода для РЛС и систем связи, функционирующих в диапазоне частот 18...42 ГГц / В.В. Демшевский, И.А. Богачев, С.С. Сидоренко, А.Д. Кучмий, С.Е. Ушанова, М.М. Мигалин. *Электронная техника. СВЧ-техника. Серия 1, научно-технический сборник, выпуск 4 (551) 2021*. с. 35-42.
25. Экспериментальное измерение антенной решетки на основе интегрированного в подложку волновода для РЛС и систем связи / В.В. Демшевский, И.А. Богачев, С.С. Сидоренко, А.Д. Кучмий. *Электронная техника. СВЧ-техника. Серия 1, научно-технический сборник, выпуск 4 (551) 2021*. с. 43-48.