

**О.Г. Вендик <sup>1</sup>, С.Н. Морозов <sup>2</sup>, М.Д. Парнес <sup>3</sup>**

<sup>1</sup> «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

<sup>2</sup> ЗАО «Светлана-Электронприбор»

<sup>3</sup> ООО «Резонанс»

## **Фазовращатель Ка диапазона волноводного типа на р-і-п диодах**

*Представлены результаты разработки пятиразрядного фазовращателя Ка диапазона на нагруженных линиях передачи с использованием р-і-п диодов в качестве переключателей.*

**Ключевые слова:** фазовращатель, р-і-п диод, волновод

### **Введение**

Основной областью применения фазовращателей Ка диапазона являются фазированные антенные решетки, в которых фазы излучающих элементов перестраиваются с целью формирования электромагнитной волны, сканирующей на определённый угол [1].

Целью данной работы является проектирование фазовращателя для линий передачи в диапазоне частот Ка. Для данного частотного диапазона предпочтительна волноводная линия [2–5]. Преимуществом волноводных фазовращателей по сравнению с монолитными приборами является значительно большая передаваемая мощность и более низкий уровень вносимых потерь.

Перспективным является использование фазовращателей на нагруженных линиях передачи с использованием р-і-п диодов в качестве переключателей [6]. Фазовращатель на нагруженной линии передач обычно используется для сдвига фаз на 45 градусов и менее. В таком случае, можно обеспечить хорошее согласование, низкий уровень потерь и постоянную амплитудно-фазовую характеристику. Большой сдвиг по фазе требует более сложной схемы фазовращателя, которая будет являться последовательным соединением двух или четырёх 45-градусных секций.

Для реализации нагруженных линий предполагается использование печатных проводников и сосредоточенных RLC элементов, секций линий передач, распределённых индуктивностей и контактных площадок для монтажа р-і-п диодов. Такая конструкция сочетает преимущества волноводной линии передач с низкими вносимыми потерями и простоту изготовления печатной платы, обуславливающей точные размеры проводников и недорогой монтаж диодов.

Нагруженные линии проектировались таким образом, чтобы создавать индуктивное или ёмкостное сопротивление в соответствии с двумя состояниями р-і-п диодов. Располагая реактивные нагрузки на расстоянии приблизительно в четверть длины волны можно минимизировать и стабилизировать отклонения амплитуды в обоих состояниях. Аналогичная модель фазовращателя с нагруженной линией передач на основе р-і-п диодных перестраиваемых компонентов была описана в патентах [7, 8].

Нагрузка, устанавливаемая в волноводе представляет собой последовательное включение трёх р-і-п диодов и двух индуктивных стержней. Модель управляемой нагрузки отображена на Рис. 1.

Где  $b$  и  $r$  – длина и действующий радиус индуктивного штыря. Индуктивный сегмент может быть выполнен не только как стержень радиуса  $r$ , но и как секция планарной линии передачи. Маленькая часть нагрузки длины  $s$  принадлежит р-і-п диоду с его контактными площадками. Полная длина управляемой нагрузки  $h$  равна высоте волновода.

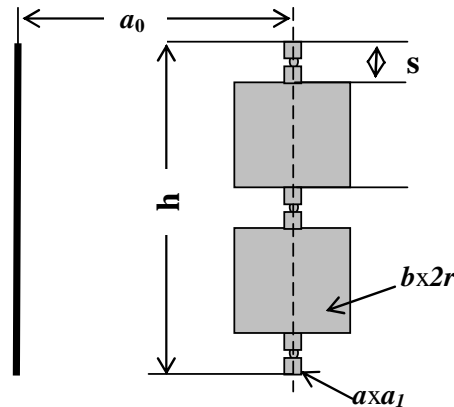


Рисунок 1

### Моделирование импеданса переключаемой нагрузки

Мы рассмотрим два вида моделирования импеданса переключаемой нагрузки:

1) Аналитическая модель и 2) Полный волновой 3D анализ электромагнитного поля.

1) Аналитическая модель основана на расчете импеданса переключаемой нагрузки, включённой в волновод в качестве шунта в двух состояниях р-і-п диодов (во включённом и в выключенном), принимая во внимание зависимость характеристического импеданса индуктивного шлейфа от расстояния до стенки волновода и преобразования параллельного импеданса. Результаты моделирования на частоте 33 ГГц отображены на Рис. 2 и 3.

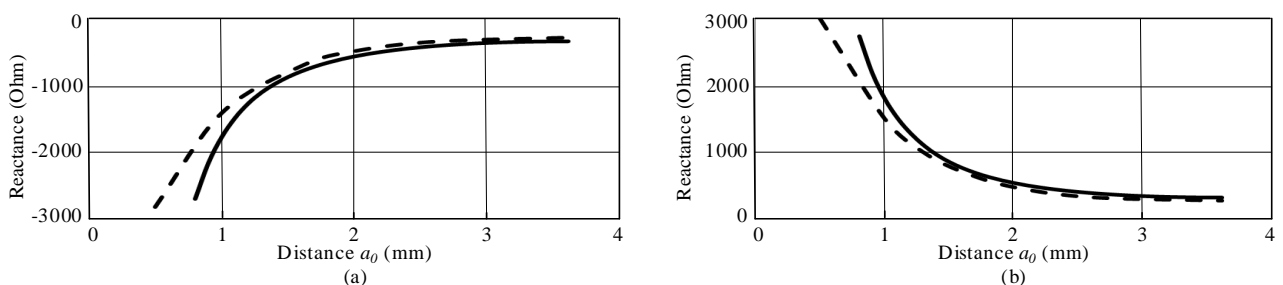


Рисунок 2. Реактивное сопротивление нагруженной линии: состояние ёмкости (а), состояние сопротивления диода (b). Сплошная линия – аналитическая модель, пунктирная линия – полный волновой анализ.

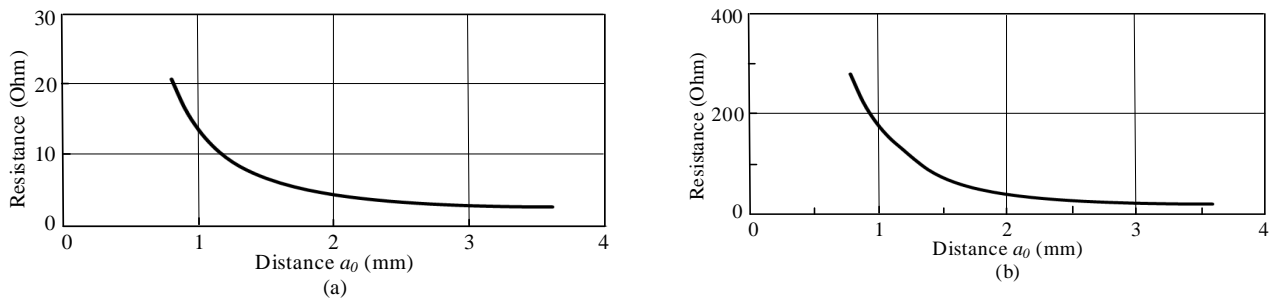


Рисунок 3. Сопротивление нагруженной линии: состояние ёмкости (а), состояние сопротивления диода (б).

2) Для полного волнового анализа была использована геометрия индуктивного шлейфа, отображённая на Рис. 1 расположенного в волноводе. Принималось во внимание расстояние от стенки волновода. Результаты такого моделирования представлены на Рис. 2 пунктирной линией.

Результаты моделирования с использованием аналитической модели хорошо совпадают с расчетами, основанными на полном волновом анализе. Частотная зависимость импедансов шунта  $Z_1(f)$  и  $Z_2(f)$  представлена на Рис. 4.

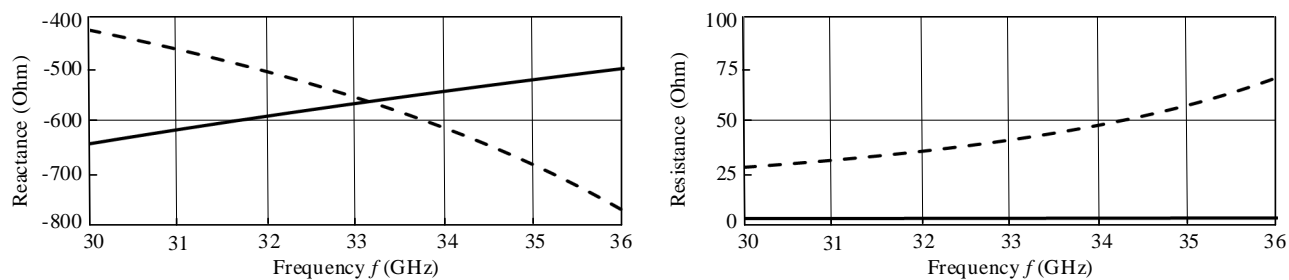


Рисунок 4. Импедансы шунта  $Z_1(f)$  и  $Z_2(f)$ : мнимая часть импеданса (а), действительная часть импеданса (б). Пунктирная линия – включённое состояние, сплошная линия – выключенное состояние.

### Эксперимент

Пятиразрядный волноводный фазовращатель Ка диапазона был спроектирован с использованием метода, описанного выше. Все разряды были изготовлены по технологии печатных плат. Печатная плата располагается на расстоянии  $a_0 = 0.085w$  от узкой стенки волновода. Разряды были реализованы с помощью структуры, содержащей шлейф, спроектированный как секция линии передач, периодически нагружаемой тремя кремниевыми р-і-п диодами с балочными выводами. Расстояние между шлейфами волновода составляло примерно четверть длины волны в волноводе.

Разряды более высокого порядка,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $180^\circ$  были смонтированы на печатных платах на расстоянии  $a_0 = 0.2w$  от узкой стенки волновода. Проводники были вытравлены на фольгированном диэлектрике.

Конструкция фазовращателя представлена на Рис. 5, 6. Разделенный волновод используется для обеспечения установки печатной платы с р-і-п диодами на расстоянии от узкой стенки волновода  $a_0$ . Высота платы  $h$  больше, чем высота волновода, это позволяет

расположить фильтры для источника постоянного тока и контактные площадки для подачи напряжения на р-і-п диоды за пределами волновода.

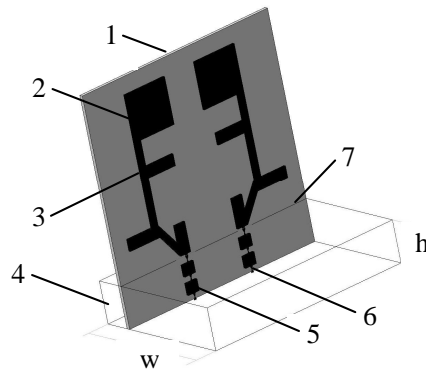


Рисунок 5. Общий вид фазовращателя (один бит): 1 – фольгированный диэлектрик, 2 – площадка контроля напряжения, 3 – фильтр постоянного тока, 4 – волновод, 5 – индуктивности, 6 - р-і-п диод, 7 – секция волноводной линии.

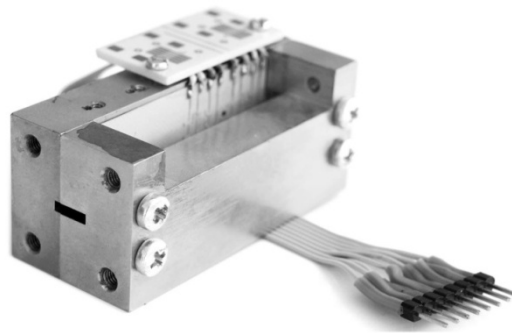


Рисунок 6

Результаты измерений представлены на Рис. 7 и 8.

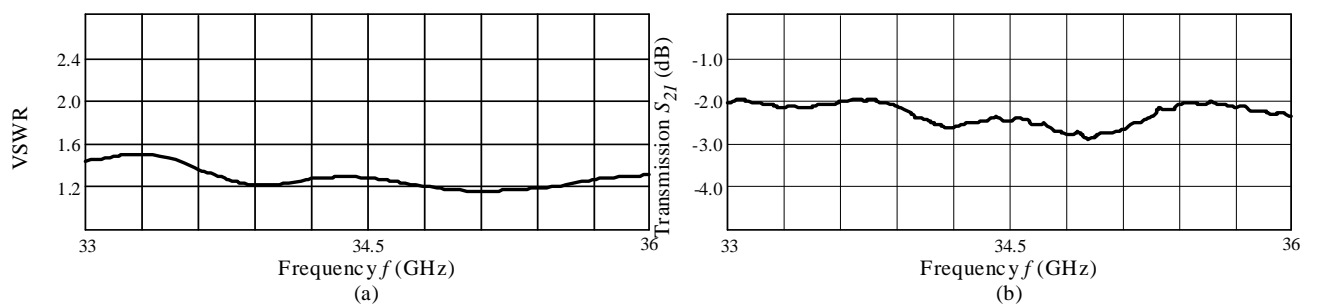


Рисунок 7. Коэффициент стоячей волны (а), потери (б).

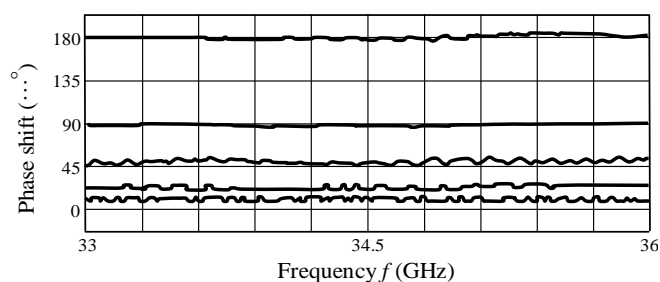


Рисунок 8

### Заключение

Был реализован макет фазовращателя Ка диапазона. Для описанного частотного диапазона была использована волноводная линия. Было подтверждено преимущество волноводных фазовращателей в сравнении с монолитными приборами за счёт более низкого уровня вносимых потерь.

Были использованы два способа моделирования импеданса переключаемой нагрузки: 1) Аналитическая модель 2) Полноволновой 3D анализ электромагнитного поля. Результаты моделирования с использованием аналитической модели и результаты полного анализа хорошо согласуются между собой и с результатами экспериментальных измерений.

Использование аналитической модели позволяет разработать некоторые предварительные версии фазовращателя в короткие сроки. Полный волновой 3D анализ электромагнитного поля позволяет улучшить проект на стадии разработки. Конечный результат необходимо подтвердить экспериментальными измерениями.

### Библиографический список

1. R.J. Mailoux, "Phased Array Antenna Hand-book", Boston, London: Artech House Inc., 1994.
2. H.Callsen, H.H. Meinel, and W.J.R. Hoefler, "p-i-n Diode Control Devices in E-Plane Technique", , IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-37, 2, Feb.. 1989, pp. 307 – 316.
3. K. Chang, et. al., "W-Band (75 to 110 GHz) Microstrip Components," 1985 IEEE-MTT Microwave Symposium Digest Technical Papers, June 1985, pp. 371-374.
4. C. Nguyen and P. Yen, "A W-Band (75 to 110 GHz) Broadband Microstrip Phase Shifter", 16th European Microwave Conference, Sep. 1986, pp. 133 – 136.
5. K.L. Virga, A.F. Seaton, and L.R. Walker, "A Waveguide Switched-Susceptance (Diode-Patch) Phase shifter", Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International, Jun. 1989, Vol.1, pp. 123 – 126.
6. S. K. Koul and B. Bhat, "Microwave and millimeter wave phase shifters," in the book: Semiconductor and Delay Line Phase Shifters. Norwood, MA: Artech House, 1991..
7. K. Lowe, D.D. Lynch, S. Panaretos, and A. Seaton, "Diode Patch Phase Shifter Insertable into a Waveguide", United States Patent, No. 5,170,140, Date of patent: Dec. 8, 1992.
8. K.Lowe, D.D. Lynch, and A. Seaton, "Diode patch phase shifter", European patent Specification No. 0 357 955 B1, date of publication: 29.09.93.