

# НИЗКОПРОФИЛЬНЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ МОСТ

## LOW-PROFILE WAVEGUIDE BRIDGE

*A. Suchkov*

### Annotation

Developed and experimentally researched the design of waveguide cophased-antiphase power divider S-band with an adjustable division ratio. It is determined that the divider implemented on the basis of two 3-decibel directional couplers and a phase shifter connected between them, provides improved in comparison with known modifications of the waveguide sum-difference device electrical characteristics. Equations for calculating design of dual-channel tunable waveguide phase shifter without dielectric filling, which provides a constant phase difference between channels in a wide frequency range are presented. Modern technological methods of manufacturing of unit using the machines with programmed numerical control are considered.

**Keywords:** waveguidebridge, division ratio, directional coupler, electromagnetic simulation.

**Сучков Александр Владимирович**  
АО "Научно-производственное объединение, "Лянозовский электромеханический завод", г. Москва

### Аннотация

Разработана и экспериментально исследована низкопрофильная конструкция волноводного мостового делителя мощности S-диапазона с регулируемым коэффициентом деления. Установлено, что делитель, реализованный на базе двух 3-децибелных направленных ответвителей и фазовращателя, включенного между ними, обеспечивает более высокие по сравнению с известными вариантами волноводных суммарно-разностных устройств электрические характеристики. Приведены соотношения для расчета конструкции двухканального перестраиваемого волноводного фазовращателя без диэлектрического заполнения, который обеспечивает постоянство разности фаз между каналами в широком диапазоне частот. Рассмотрены современные технологические методы изготовления устройства с использованием станков с числовым программным управлением.

### Ключевые слова:

Волноводный мост, коэффициент деления, направленный ответвитель, электродинамическое моделирование.

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие и совершенствование современных радиолокационных систем делает весьма актуальной задачу разработки высококачественных мостовых устройств, предназначенных для запитки волноводных диаграммообразующих схем моноимпульсных антенн с частотным сканированием [1], [2], поскольку характеристики этих устройств в значительной мере определяют качество формируемых диаграмм направленности суммарного и разностного каналов.

Поэтому основным требованием, предъявляемым к мостовым устройствам, является достижение оптимальных электродинамических параметров с точки зрения реализации заданных амплитуд и фаз на выходах в рабочем диапазоне частот, минимального амплитудного и фазового разбаланса, минимальных вносимых потерь, необходимой развязки между выходами, хорошего согласования выходов.

Основными недостатками известных и широко применяемых волноводных мостовых устройств (щелевой

мост, кольцевой мост, двойной T-мост) [3], [4] являются их относительная узкополосность, а также практическое отсутствие возможности регулировки выходных электрических параметров, которые могут иметь существенное отклонение от расчетных, за счет влияния разброса технологических допусков при изготовлении.

С учетом обозначенных выше проблем была поставлена задача разработки и экспериментального исследования характеристик низкопрофильной конструкции волноводного моста с регулируемым коэффициентом деления в S-диапазоне.

## Принцип построения устройства

Для решения поставленной задачи был предложен вариант реализации волноводного мостового устройства на базе 2-х 3-децибелных направленных ответвителей (НО) и фазовращателя (ФВ), включенного между ними (рис. 1).

Рассмотрим принцип работы устройства. При возбуждении плеча 1 мощность делится в требуемом соотноше-

нии между плечами 2 и 3, возбуждая их синфазно. Плечо 4 оказывается развязанным, так как волны распространяющиеся по устройству в этой области равны и противофазны. При возбуждении плеча 4 мощность также делится в требуемом соотношении между плечами 2 и 3, возбуждая их однако в противофазе. Плечо 1 при этом оказывается развязанным. Коэффициент деления моста определяется значением разности фаз сигналов на выходах фазовращателя.

Каждый 3-децибельный НО, входящий в состав конструкции устройства, выполнен в виде 2-х параллельных прямоугольных волноводов с Т-образным элементом связи в общей широкой стенке. Различные подходы к расчету рабочих характеристик и параметров конструкции, а также технология изготовления таких НО подробно рассмотрены в [5], [6].

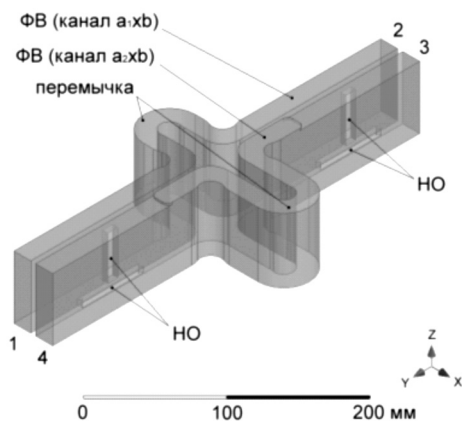


Рис. 1. Волноводный мост (электродинамическая модель).

### Волноводный фазовращатель

Оригинальным элементом, определяющим качество характеристик предлагаемого варианта мостового устройства, является перестраиваемый двухканальный фазовращатель, обеспечивающий постоянство разности фаз между волноводными каналами в широком диапазоне частот, без применения в составе его конструкции диэлектрических фазосдвигающих клиньев.

Принцип работы фазовращателя основан на предположении, что два прямоугольных волновода с сечениями каналов  $a_1 \times b$  и  $a_2 \times b$  и длинами  $L_1$  и  $L_2$ , соответственно, могут обеспечить постоянство разности фаз  $\Delta\phi$  в диапазоне длин волн от  $f_H$  до  $f_B$ .

Тогда, принимая известными значения  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b$ ,  $f_H$ ,  $f_B$  и  $\Delta\phi$  величины  $L_1$  и  $L_2$  могут быть определены исходя из следующих соотношений:

$$L_1 = \frac{\Delta\phi}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1 - \frac{\Lambda_{H2}}{\Lambda_{B2}}}{\frac{1}{\Lambda_{B1}} - \frac{1}{\Lambda_{B2}} - \frac{\Lambda_{H2}}{\Lambda_{B2}} \cdot \left( \frac{1}{\Lambda_{H1}} - \frac{1}{\Lambda_{H2}} \right)} \quad (1)$$

$$L_2 = L_1 + \Lambda_{H2} \cdot \left[ L_1 \cdot \left( \frac{1}{\Lambda_{H1}} - \frac{1}{\Lambda_{H2}} \right) - \frac{\Delta\phi}{2 \cdot \pi} \right] \quad (2)$$

где  $\Lambda_{H1}$ ,  $\Lambda_{B1}$ ,  $\Lambda_{H2}$ ,  $\Lambda_{B2}$

– (см. соотношения (3)) длина волны в волноводе с соответствующим поперечным сечением  $a_1 \times b$  ( $a_2 \times b$ ) на нижней ( $f_H$ ) и верхней ( $f_B$ ) частотах рабочего диапазона:

$$\Lambda_{H1(2)} = \frac{c}{f_H \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{c}{2 \cdot f_H \cdot a_{1(2)}} \right)^2}}; \quad (3)$$

$$\Lambda_{B1(2)} = \frac{c}{f_B \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{c}{2 \cdot f_B \cdot a_{1(2)}} \right)^2}}$$

Необходимо отметить, что в соответствии с формулами (1) и (2) длина фазовращателя определяется соотношением размеров широких стенок волноводных каналов  $a_1$  и  $a_2$ .

При этом, исходя из соображений упрощения реализации топологии устройства значение  $a_1$  целесообразно выбрать равным величине широких стенок волноводных линий НО.

Для обеспечения согласования канала фазовращателя, имеющего сечение  $a_2 \times b$ , с волноводными линиями НО с сечением  $a_1 \times b$  (при  $a_2 - a_1 \geq 4..5$  мм) в конструкции устройства должны быть предусмотрены согласующие четвертьволновые трансформаторы.

Также было установлено, что частотная неравномерность разности фаз  $\Delta\phi$  увеличивается с ростом величины  $\Delta\phi$  и по результатам расчетов не превышает значения  $\pm 0,5^\circ$  при  $\Delta\phi = 180^\circ$  в диапазоне частот около 6% (рис. 2).

Для сравнения на рис. 2 также приведена частотная неравномерность фазовращателя выполненного на базе 2-х волноводных каналов одинакового сечения  $a_1 \times b$  (показано пунктирной линией).

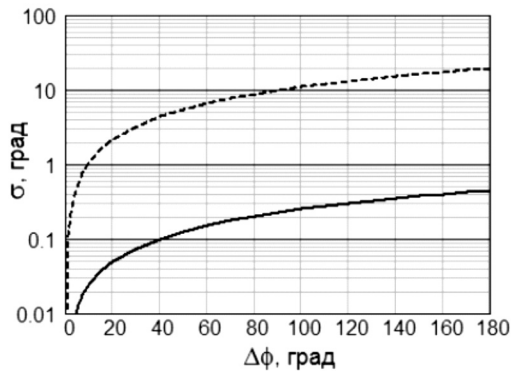


Рис. 2. Частотная неравномерность фазовращателя.

### Основные характеристики

Моделирование волноводного мостового устройства выполнялось на основе разработанной трехмерной электродинамической модели (рис. 1) методом конечных элементов в специализированном программном пакете. По результатам электродинамического моделирования была разработана и изготовлена конструкция экспериментального образца устройства. На рис. 3. приведены амплитудные характеристики устройства (при различных значениях  $\Delta\phi$ ), полученные по результатам электродинамических расчетов (сплошная и пунктирная линии), а также характеристики экспериментального образца (обозначены точками), измеренные с помощью векторного анализатора цепей *Agilent E5071B* на средней частоте 2775 МГц.

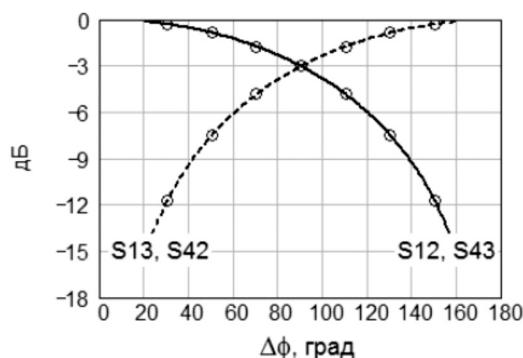


Рис. 3. Характеристики мостового устройства.

Результаты расчетов и эксперимента также показали, что амплитудные и фазовые характеристики мостового устройства при различных значениях  $\Delta\phi$  остаются стабильными в полосе частот около 6%. При этом разбаланс амплитуд на выходах устройства составляет менее  $\pm 0,1$  дБ, вносимые потери – около 0,05 дБ, фазовый разба-

ланс – не более  $\pm 1^\circ$ .

Устройство имеет высокую развязку выходов, которая составляет 25 дБ, а также хороший уровень согласования – КСВН любого из 4-х выходов устройства не превышает значения 1,15 во всем рабочем диапазоне частот (от 2690 МГц до 2860 МГц).

Видно, что при перестройке фазовращателя в пределах  $20^\circ \dots 160^\circ$  динамический диапазон изменения коэффициента деления устройства составляет не менее 15 дБ. Эта особенность позволяет компенсировать влияние технологических допусков изготовления на амплитудные характеристики устройства при сохранении качества согласования, развязок между выходами и фазовых характеристик.

### Конструктивно-технологическая реализация

Современная технология изготовления с использованием станков с числовым программным управлением (ЧПУ) предполагает реализацию конструкции моста (рис. 1.) в виде сборки 2-х зеркально-симметричных фрезерованных соответствующим образом алюминиевых пластин, образующих при сопряжении по плоскости, проходящей через середины широких стенок волноводных каналов, корпус устройства.

Внутри корпуса расположена топология направленных ответвителей и фазовращателя.

Фрезеровка волноводной топологии фазовращателя производится с помощью стандартной торцевой фрезы диаметром 10 мм. Технология изготовления НО рассмотрена в [5].

Для обеспечения регулировки коэффициента деления необходимо иметь возможность изменения длин каналов фазовращателя  $L_1$  и  $L_2$ . Для этого волноводная топология каждого из каналов фазовращателя имеет два выхода, сопрягаемых с помощью фланцевого соединения с перемычкой, которая представляет собой поворот волновода в Е-плоскости на  $180^\circ$ .

При регулировке устройства между перемычкой и выходами каналов фазовращателя устанавливаются дополнительные отрезки волноводов (волноводные вставки с сечениями каналов  $a_1 \times b$  и  $a_2 \times b$ ), обеспечивающие необходимое соотношение длин  $L_1$  и  $L_2$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Высокие электрические характеристики мостового устройства достигнуты за счет применения рассчитанного в соответствии с выражениями (1) и (2) фазовращателя, обеспечивающего постоянство разности фаз между волноводными каналами в рабочей полосе частот с частотной неравномерностью порядка  $\pm 0,5^\circ$ .

2. Влияние технологических допусков изготовления на амплитудные характеристики устройства компенсируется возможностью регулировки коэффициента деления.

3. Электрическая прочность устройства ограничивается размерами поперечной и продольной щелей Т-образного элемента связи в направленных ответвителях, примененных в составе конструкции.

4. Технология изготовления моста позволяет интегрировать его конструкцию (с целью синфазно-противофазной запитки) в топологию фрезерованных волноводных распределителей мощности антенн моноимпульсных радиолокационных станций [2].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бородин Н.Д., Исаков М.В. // Патент 2490760 (РФ). Моноимпульсная антенна с частотным сканированием. Оpubл. в Б. И., 2013. № 23.
2. Сучков А.В. Моноимпульсная волноводно-щелевая антенная решетка с частотным сканированием // Аннотации работ 7-го межотраслевого молодежного конкурса научно-технических работ и проектов "Молодежь и будущее авиации и космонавтики". (Москва, 17 ноября 2015). Москва: МАИ. 2015. С. 176-178.
3. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и перераб. М.: Радиотехника. 2006. 376 с.
4. Фельдштейн А.Л., Явич Л.Р., Смирнов В.П. Справочник по элементам волноводной техники. М.: Сов. Радио, 1967. 652 с.
5. Сучков А.В. Характеристики и практическое применение технологичной конструкции волноводного Т-щелевого направленного ответвителя // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия "Естественные и технические науки".
6. Сосунов В.А., Шибяев А.А. Направленные ответвители сверхвысоких частот. Саратов. Приволжское книжное издательство. 1964. 136 с.

© А.В. Сучков, (avs@bk.ru), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,

56 WEB STUDIO 2GIS OMG Orenburg Media Group

Оренбуржье сердце Евразии

НЕФТЬ ГАЗ ЭНЕРГО 2016

ХIII СПЕЦИАЛИЗИРОВАННАЯ  
• ВЫСТАВКА •  
«НЕФТЬ. ГАЗ. ЭНЕРГО»

- Добыча нефти и газа (технологии и оборудование)
- Геология, геофизика
- Сейсмическое оборудование и услуги
- Транспортировка, переработка и хранение нефти, нефтепродуктов и газа

17 - 19 ФЕВРАЛЯ

Оренбург

ООО «УралЭкспо»