

ВОЛНОВОДНО-ПОЛОСКОВОЕ ТУРНИКЕТНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

М.Г. Вахитов, Н.И. Войтович, А.Н. Соколов, Н.Н. Репин

Многие практические применения в технике СВЧ требуют, чтобы были использованы одновременно волноводные устройства и устройства, построенные на основе полосковых линий передачи.

Известны, например, плоские антенны, в которых делитель мощности построен на основе полосковой линии передачи [1]. Однако, конвертор, входящий в систему для приёма сигналов со спутника и присоединяемый непосредственно к плоской антенне, имеет волноводный вход. С целью обеспечения согласования симметричной полосковой линии с волноводным входом конвертора обычно используют четвертьволновый отрезок волновода, который встраивается в конструкцию антенны [2]. Однако введение в состав антенны четвертьволнового отрезка волновода усложняет конструкцию антенны, снижает эффективность использования раскрытия антенны и, как следствие, уменьшает коэффициент усиления антенны. Проблема перехода от полосковой линии к волноводу усугубляется, когда антенна должна иметь круговую поляризацию поля излучения. В этом случае в волновод вводится не одна, как это реализовано в антеннах линейной поляризации, а две или четыре полоски. В последнем случае получается устройство, аналогичное устройству симметричного крестообразного соединения двух прямоугольных волноводов и круглого волновода, и известное под названием «турникет» [3, 4]. Устройство, содержащее четыре симметричных полосковых линии, соединенных крестом в плоскости полосок, и круглый волновод, ось которого проходит через центр креста перпендикулярно плоскости креста, будем называть волноводно-полосковым турникетным соединением (ВПТС) [5].

На рис. 1 представлено трехмерное изображение волноводно-полоскового турникетного соединения (ВПТС) в разобранном виде. ВПТС состоит из круглого волновода 1 и плоско-слоистой структуры, которая включает в себя первый экран 2, первую диэлектрическую пластину 3, центральный проводник 4 (E_2), вторую диэлектрическую пластину 5, второй экран 6. Кроме того, ВПТС содержит согласующую пластину 7 (E_1) и четыре сегмента 8-11. Центральный проводник 4 (E_2) (рис. 2) включает в себя полосковый резонатор, четыре центральных проводника полосковых линий и четыре согласующих трансформаторов. Полосковый резонатор имеет квадратную форму. На первом экране вырезано круглое отверстие 12. Ось OZ на рис. 1 перпендикулярна плоско-слоистой структуре и проходит через центр структуры. Ось OZ является в устройстве осью симметрии четвер-

того порядка. Сегменты устанавливаются между экранами таким образом, что совместно образуют короткий отрезок круглого волновода с четырьмя боковыми отверстиями. Этот короткий отрезок волновода является продолжением круглого волновода 1 в область между экранами. В отверстие 12 устанавливается согласующая пластина 7 (E_1). В результате образуется апертура в виде кольцевой щели, расположенной в плоскости M_2 .

1. Теория

Общая электромагнитная задача сформулирована для трёх областей (0, 1 и 2), электромагнитно связанных через апертуры, расположенные в плоскостях M_1 и M_2 (рис. 1). Область 0-волновод, простирающийся от $z = -\infty$ до некоторого сечения $z = z_0$, где z_0 - величина порядка длины волны. Область 2 - отрезок волновода между сечением $z = z_0$ и сечением в плоскости M_2 (плоскости первого экрана).

Область 2 - область полосковых линий передачи с центральным проводником 4 (E_2). При формулировке задачи использован метод эквивалентных токов, который предполагает, что все области замкнуты, а конструктивные элементы и отверстия апертур при расчёте учитываются введением соответствующих эквивалентных токов. Использовано равенство нулю тангенциальной компоненты электрического поля \vec{E} на согласующей пластине, поверхности полосок и непрерывность тангенциальной компоненты магнитного поля \vec{H} на апертурах при переходе из одной области в другую. Полагается также, что источником электромагнитного поля является «падающая» волна H_{11} , распространяющаяся в области 0 из бесконечности в направлении креста, напряженность магнитного поля падающей волны обозначена как \vec{H}_{10}^0 . В результате получена система интегральных уравнений относительно распределений плотности электрических токов на согласующей пластине $-\vec{J}^{E_1}$, на поверхности полосок $-\vec{J}^{E_2}$ и магнитных токов на апертурах: \vec{J}^{M_1} , \vec{J}^{M_2} .

В частности, на апертуре в плоскости M_1 (при переходе из области 0 в область 1):

$$\begin{aligned} \vec{H}^0 \left\{ \vec{J}^{M_1} \right\} + \vec{H}^1 \left\{ \vec{J}^{M_1} \right\} - \vec{H}^1 \left\{ \vec{J}^{E_1} \right\} - \\ - \vec{H}^1 \left\{ \vec{J}^{M_2} \right\} = -\vec{H}_{10}^0, \end{aligned} \quad (1)$$

на поверхности согласующей пластины E_1 (в области 1):

$$-\dot{\vec{E}}^1 \{ \dot{\vec{j}}^{M_1} \} + \dot{\vec{E}}^1 \{ \dot{\vec{j}}^{E_1} \} + \dot{\vec{E}}^1 \{ \dot{\vec{j}}^{M_2} \} = 0, \quad (2)$$

на апертуре в плоскости M_2 (при переходе из области 1 в область 2):

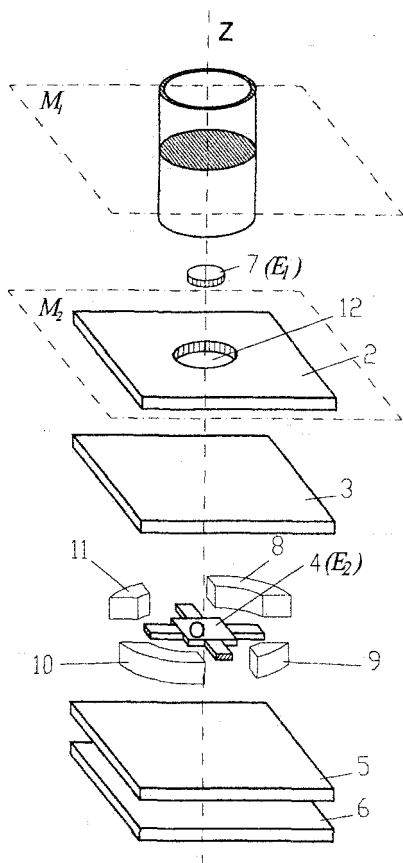


Рис. 1. Волноводно-полосковое турникетное соединение

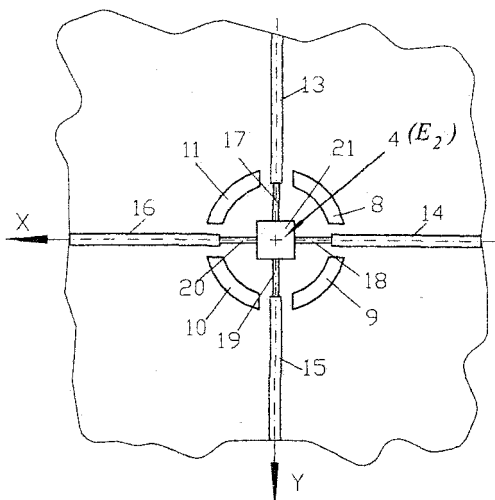


Рис. 2. Полосковый делитель мощности

$$-\dot{\vec{H}}^1 \{ \dot{\vec{j}}^{M_1} \} + \dot{\vec{H}}^1 \{ \dot{\vec{j}}^{E_1} \} + \dot{\vec{H}}^1 \{ \dot{\vec{j}}^{M_2} \} = -\dot{\vec{H}}^2 \{ \dot{\vec{j}}^{M_2} \} + \dot{\vec{H}}^2 \{ \dot{\vec{j}}^{E_2} \}, \quad (3)$$

на поверхности полосок E_2 (в области 2):

$$-\dot{\vec{E}}^2 \{ \dot{\vec{j}}^{M_2} \} + \dot{\vec{E}}^2 \{ \dot{\vec{j}}^{E_2} \} = 0, \quad (4)$$

где верхний индекс векторов электрического и магнитного полей обозначает область, для которой записаны соответствующие характеристики. Электрические и магнитные поля находятся с использованием тензорной функции Грина. Для решения системы интегральных уравнений используется метод Галёркина.

Экспериментальные результаты

Для проведения экспериментальных исследований в диапазоне частот 12 ГГц был изготовлен макет ВПТС (рис. 3). Размеры экранов равны 100x100 мм². Диаметр круглого волновода равен 19 мм. Сегменты изготовлены из кольца с внутренним диаметром 19 мм и внешним диаметром 23 мм. В кольце вырезаны 4 паза шириной 8 мм каждый. Высота сегментов равна 3 мм.

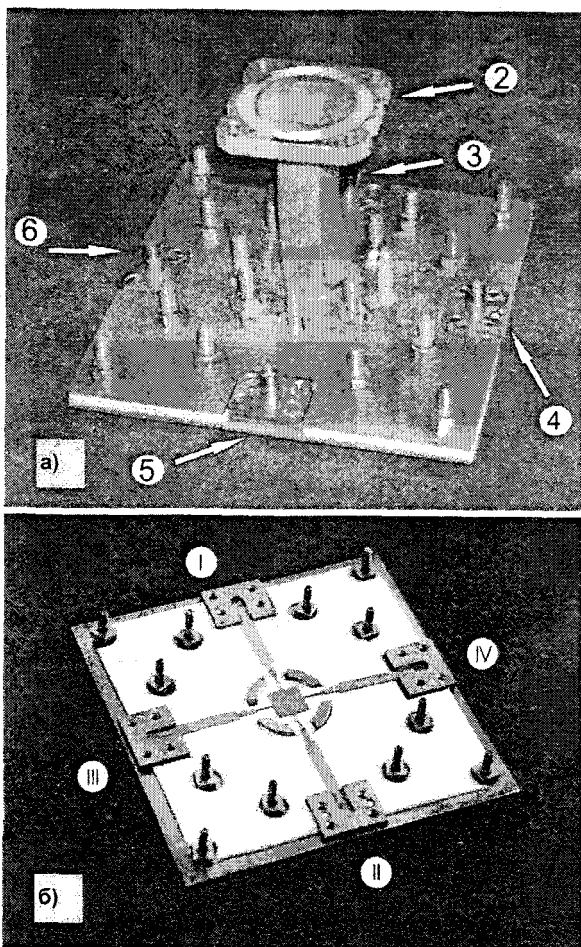


Рис. 3. Макет ВПТС

Согласование ВПТС было достигнуто, используя полосковый резонатор, согласующие устройства и согласующую пластину. Согласующие устройства были выполнены в виде двухступенчатых трансформаторов. Полосковый резонатор представлен квадратом со стороной 10,4 мм. От-

носительная диэлектрическая проницаемость первой и второй диэлектрических пластин равна 1,13. В круглом волноводе возбуждалась волна H_{11} .

На макете проведено исследование влияния размера согласующей пластины на величину коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВ) в круглом волноводе. На рис. 4 приведены графики КСВ волноводно-полоскового турникетного соединения в круглом волноводе, в том случае, когда согласующая пластина в соединении отсутствует и при ее наличии в соединении.

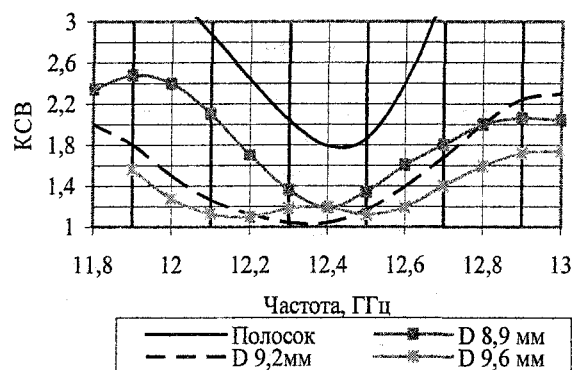


Рис. 4. Зависимость КСВ от частоты в круглом волноводе ВПТС при различных диаметрах согласующей пластины

Как видно из рассмотрения графиков на рис. 4, при отсутствии пластины в соединении зависимость КСВ в диапазоне частот 12,1-12,65 ГГц имеет один явно выраженный минимум, величина КСВ в точке минимума равна 1,78. На частотах вне указанного диапазона частот величина КСВ имеет недопустимо высокие значения.

С ростом диаметра согласующей пластины минимальное значение КСВ стремится к 1 и достигает этого значения при диаметре пластины, примерно равном 9,2 мм. При дальнейшем росте диаметра пластины зависимость КСВ в диапазоне частот 11,8-13 ГГц имеет два минимума и максимум, расположенный по середине между ними. Величина максимума с ростом диаметра пластины увеличивается. При этом ширина полосы согласования по уровню, соответствующему уровню максимума, также увеличивается.

Был проведен эксперимент по измерению характеристик ВПТС в двух случаях: в первом случае сегменты установлены в макет устройства (макет № 1), во втором случае сегменты отсутствовали в макете (макет № 2). Согласующая пластина выполнена из медной фольги в виде диска диаметром 9,2 мм и толщиной 100 микрон.

Измерение КСВ было выполнено со стороны круглого волновода. Результаты измерений представлены графиками на рис. 5. Зависимость уровня мощности в плечах приведена на рис. 6, 7.

Выходы I и II соответствуют ситуации, когда вектор \vec{E} параллелен плечам ВПТС. Выходы III и

IV соответствуют ситуации, когда \vec{E} перпендикулярен плечам ВПТС.

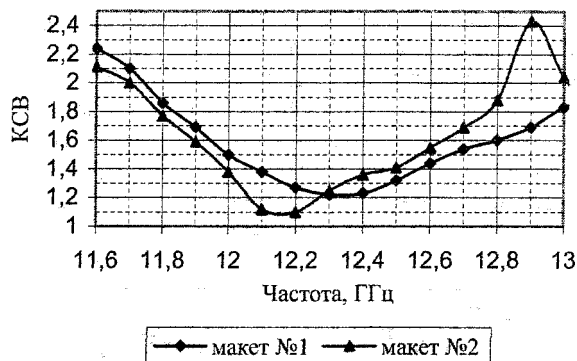


Рис. 5. Зависимость КСВ на входе круглого волновода от частоты, макеты № 1, № 2

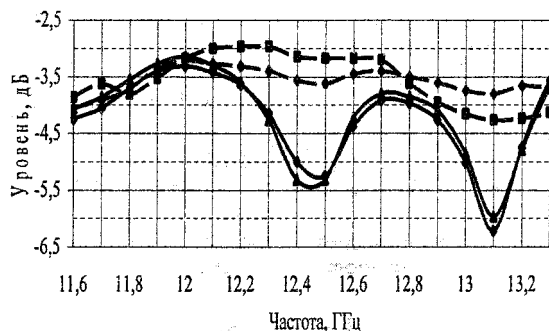


Рис. 6. Зависимость уровня мощности от частоты в плечах I и II

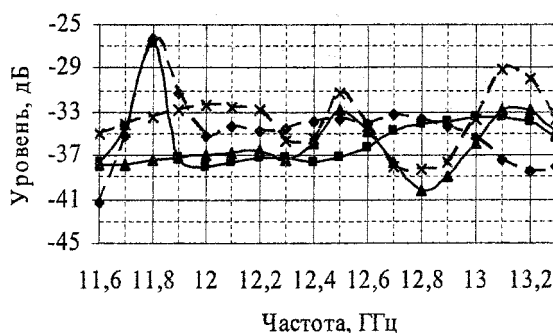


Рис. 7. Зависимость уровня мощности от частоты в плечах III и IV

Как видно, уровни мощности в плечах I и II примерно равны. Уровни мощности в плечах III и IV существенно меньше уровня мощности в плечах I и II. На рис. 8 представлена зависимость суммарной мощности в 5 плечах: мощности волн, возбуждаемых в 4-х полосковых линиях и мощности отражённой волны в круглом волноводе.

Как видно из графиков, уровень суммарной мощности отличается от мощности падающей волны на 5 % в случае, когда сегменты установлены в макете. Однако в случае, когда сегменты отсутствуют, суммарная мощность отличается от мощности падающей волны на 50 %. Этот факт свидетельствует о том, что часть мощности распространяется вне полосковых линий и круглого волновода. Следовательно, сегменты предотвращают «просачивание» мощности в область между экранами вне полосковых линий.

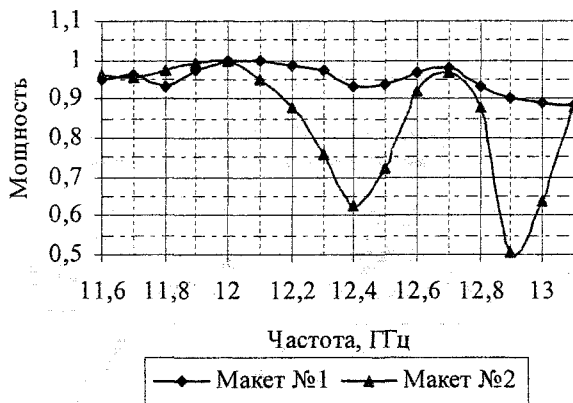


Рис. 8. Зависимость уровня суммарной мощности в плечах I – IV

Заключение

Согласование ВПТС со стороны круглого волновода достигнуто, используя полосковый резонатор, согласующие отрезки линий и согласующую пластину. Согласующие отрезки включены между резонатором и полосковыми линиями. Согласующая пластина размещена в апертуре круглого волновода. Сегменты расположены на экранах полосковых линий таким образом, что они формируют короткий отрезок волновода с четырьмя боковыми отверстиями.

Показано, что потери мощности в устройстве с сегментами меньше по сравнению с потерями мощности в устройстве без сегментов. Сделан вывод о том, что сегменты предотвращают «просачивание» мощности в область между экранами вне полосковых линий. Таким образом, применение согласующих сегментов в волноводно-полосковом турникетном соединении объективно необходимо. Они позволяют на порядок сократить величину потерь полезной мощности и улучшить развязку между «рабочими» плечами и смежными с ними плечами полоскового делителя мощности.

Литература

1. Voytovich N.J., Pechenco B.A., Sokolov A.N. Planar antenna for satellite TV reception//1998 International Symposium on electromagnetic Theory. Proceedings, 25-28 May 1998, Thessaloniki, Greece. - 1998.-P. 244-246.
2. Nakano K, Sugama M., Yamauchi J. Cavity-backed circular aperture antenna constructed using a triplate transmission line//IEE Proc.-Microw. Antennas Propag. - 1999. - Vol. 146, №. 6.
3. Апътман Дж. Устройства СВЧ. - М.: Мир, 1968.- 487 с.
4. Бровка А.В. Расчет и оптимизация симметричного турникетного соединения волноводов методом конечных элементов// Вопросы прикладной физики. -1997.- №3.- С.46-50.
5. Войтович Н.И., Вахитов М.Г., Расин А.М., Репин Н.Н. Волноводно-полосковое турникетное соединение. -Россия. МПК⁷. Н01P5/107. №2002134837/20; заявлено 2002.12.23, опубли. 2004.08.10. Приоритет 23.12.2002 (Россия).
6. Voytovich N.I., Vakhitov M.G., Rasin A.M., Repin N.N., Sokolov A.N. Waveguide-striplines turnstile// XXVII General Assembly of International Union of Radio Science (URSI), October 23-29, 2005, New Delhi, India. - 2005.