

УДК. 621.317.39

И.Б. Широков канд. техн. наук,

М.Л. Арутюнян,

И.В. Сердюк

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, Стрелецкая балка, Севастополь, Украина, 99053

E-mail: shirokov@stel.sebastopol.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОПОЛОСКОВЫХ УЗЛОВ

МИКРОВОЛНОВОГО ГОМОДИННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Проведен обзор инженерных методик расчета микроволновых полосковых узлов. Выполнен расчет и исследование основных характеристик микрополосковых антенн и квадратного моста. Проанализированы погрешности разработанных микрополосковых СВЧ узлов и приведены результаты экспериментального исследования их характеристик.

В настоящее время при разработке систем неразрушающего контроля параметров различных материалов в промышленности, медицине, экологии, все чаще отдается предпочтение тем из них, которые в качестве переносчика информации используют сверхвысокочастотное (СВЧ) электромагнитное поле. Причем наибольшей точностью обладают измерительные системы, в которых информационным параметром является фазовый сдвиг испытательной электромагнитной волны относительно опорной [1]. Как правило, основные проблемы при проектировании таких систем связаны с разработкой СВЧ тракта, от качества исполнения которого существенно зависят точностные параметры всей системы в целом. В этом отношении особый интерес представляют фазовые системы с гомодинным преобразованием частоты, которое позволяет упростить СВЧ тракт, используя микрополосковые узлы, и существенно снизить требования к стабильности частоты задающего СВЧ генератора. Структурная схема микроволнового гомодинного преобразователя и принцип его работы подробно описаны в [1].

Известные инженерные методики расчета узлов СВЧ отличаются трудоемкостью и не позволяют оценить погрешность параметров рассчитываемого СВЧ узла, обусловленную неточностью его изготовления. Погрешность изготовления СВЧ узлов имеет случайный характер, что особенно характерно для макетов узлов, изготовленных без использования специальной технологической оснастки и промышленного оборудования. Поэтому желательно иметь возможность оценить параметры проектируемого узла и их чувствительность к отклонениям геометрических размеров данного узла от заданных значений, не прибегая к изготовлению самого узла.

Применение специализированного программного обеспечения позволяет производить расчет характеристик микрополосковых СВЧ узлов. При этом в качестве исходных данных для такого расчета выступают геометри-

ческие размеры самого узла и его электрофизические параметры. Это дает возможность выполнения машинных экспериментов с последовательной коррекцией топологии микрополосковых узлов, направленной на получение требуемых характеристик. Такой метод проектирования позволяет исключить итерационные процедуры и избежать необходимости изготовления многочисленных макетов самого СВЧ узла.

Для автоматизированного расчета характеристик микрополосковых узлов применим систему автоматизированного проектирования (САПР) *Microwave Office*. Отметим, что оценка погрешности алгоритмов расчета, примененных в данной САПР, представляет собой чрезвычайно сложную задачу. Вместе с тем разработчики данной САПР дают ряд рекомендаций, выполнение которых позволяет минимизировать погрешности расчета. В дальнейшем будем считать, что величина погрешности расчета характеристик, произведенного с помощью *Microwave Office*, заведомо меньше погрешности известных методик расчета, которая обычно составляет не менее $\pm 5\%$, а также погрешностей изготовления и измерения, которые зависят от многих факторов и достигают в отдельных случаях единиц и даже десятков процентов.

Рассмотрим общие требования, предъявляемые к узлам СВЧ тракта гомодинного преобразователя, определяющие их метрологические характеристики. Одним из таких требований является размещение всех узлов СВЧ тракта преобразователя на одной печатной плате. В таблице 1 приведены типовые параметры фольгированного материала FR4, применяемого для изготовления печатных плат, при работе в частотном диапазоне до 2 ГГц.

Таблица 1 – Основные технические характеристики фольгированного материала

Наименование параметра	Значение
Толщина подложки, мм	1,5
Относительная диэлектрическая проницаемость	4,2
Тангенс угла диэлектрических потерь	10^{-4}

Рассмотрим особенности расчета антенн, используемых для облучения контролируемого материала или среды, а также квадратурных мостов, являющихся основными узлами управляемого фазовращателя и смесителя СВЧ гомодинного преобразователя.

Помимо требуемых электрических параметров конструкция антенн должна быть компактной и механически прочной. Согласно [2] этим требованиям соответствуют антенны в печатном исполнении, которые сочетают простоту конструкции, малые объем, массу и стоимость, а также хорошую воспроизводимость характеристик. Топология полосковой антенны резонаторного типа изображена на рисунке 1.

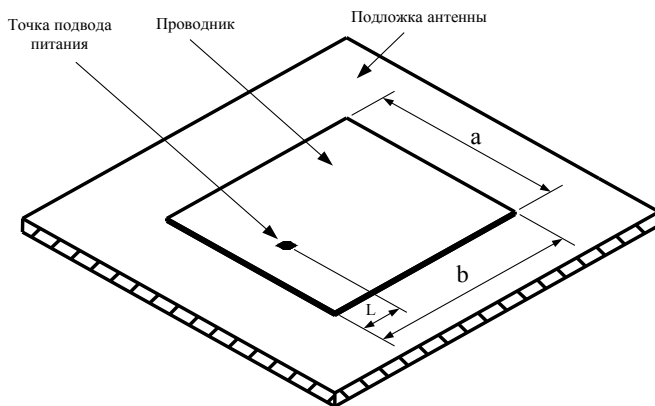


Рисунок 1 – Полосковая антенна резонаторного типа

Определим геометрические размеры полосковой антенны [2]

$$a = b = k\lambda,$$

где $k=0,4\dots0,5$ — постоянный коэффициент; λ — длина волны.

Для $k=0,45$ получим $a = b = 42,2$ мм. Определим входное сопротивление микрополосковой антенны (МПА) вблизи резонанса:

$$Z_{BX} = \frac{jX_{in} + \cos^2 k_1 L}{2G_r}. \quad (1)$$

Здесь X_{in} — сопротивление эквивалентного возбуждающего штыря; L — текущее значение размера b (см. рисунок 1), для которого вычисляется входное сопротивление; G_r — проводимость излучения щелей микрополосковой антенны; G_s — собственная проводимость излучения одиночной щели.

Положение точки подвода питания можно определить из уравнения 1, приравняв его правую часть к требуемой величине входного сопротивления и решив полученное уравнение относительно L . Из (1) для входного сопротивления антенн 50 Ом $L=14,8$ мм.

Используя рассчитанные размеры микрополосковой антенны, промоделируем ее в *Microwave Office*. На рисунке 2,а показаны зависимости вещественной и мнимой частей входного сопротивления микрополосковой антенны от частоты с неоптимизированными (штрихпунктирная линия) и оптимизированными (сплошная линия) размерами.

Экспериментальные характеристики зависимости КСВ двух микрополосковых антенны изображены на рисунке 2,б (штриховые линии). Сравнивая эти характеристики, с расчетными (рисунк 2,б – сплошная линия), можно отметить хорошее соответствие теоретических и экспериментальных результатов.

Рассчитаем геометрические размеры квадратурного моста. Топология такого моста в полосковом исполнении изображена на рисунке 3. Проводимости плеч моста связаны следующими соотношениями [4]:

$$Y_1 = Y_0; Y_2 = \sqrt{2}Y_0.$$

Перейдя от проводимостей к сопротивлениям, получим:

$$\rho_1 = \rho_0; \rho_2 = \frac{\rho_0}{\sqrt{2}}.$$

При $\rho_0=50$ Ом $\rho_2=35,4$ Ом.

Для определения геометрических размеров квадратурного моста воспользуемся уравнением для волнового сопротивления микрополосковой линии [4]

$$\rho_0 = \frac{120\pi}{\frac{w}{h} + 2,42 - 0,44 \frac{h}{w} + \left(1 - \frac{h}{w}\right)^6}, (2)$$

где w – ширина МПЛ; h – толщина фольгированного материала.

Решая уравнение (2) относительно w , находим, что при $\rho_0=50$ Ом и $h=1,5$ мм ширина микрополосковой линии равна $w=3$ мм. Соответственно при $\rho_0=35$ Ом и $h=1,5$ мм $w=5$ мм. Длины плеч квадратурного моста должны составлять $\frac{\lambda}{4}$ [4]. При распространении в

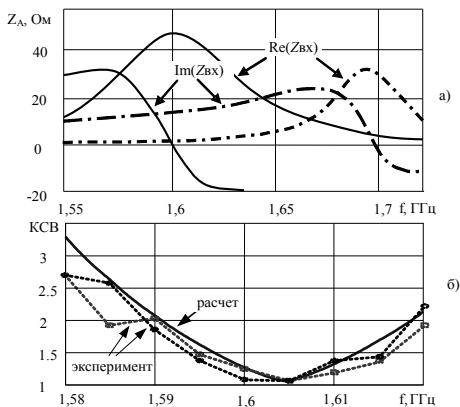


Рисунок 2 – Характеристики рассчитываемых антенн: а) входное сопротивление; б) коэффициент стоячей волны

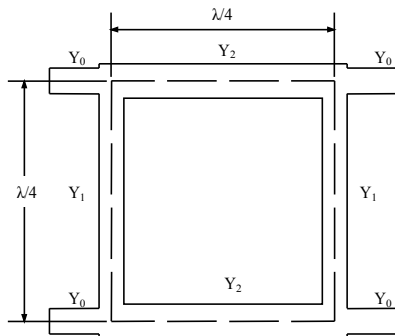


Рисунок 3 – Топология микрополоскового квадратурного моста

несимметричной полосковой линии недиспергирующей волны, близкой к волне типа Т, длина волны в линии составляет [3]

$$\lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{эф}}}, \quad (3)$$

где λ_0 – длина волны в свободном пространстве; $\varepsilon_{эф}$ – относительная эффективная диэлектрическая проницаемость.

Величина $\varepsilon_{эф}$ зависит от отношения w/h , диэлектрической проницаемости материала и может быть вычислена по приближенной формуле

$$\varepsilon_{эф} = 0,5(\varepsilon + 1) + 0,5(\varepsilon - 1) \cdot \left(1 + 10 \frac{h}{w}\right)^{-0,5}. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) было найдено, что у моста, имеющего ширину полоска 3 мм, длина плеч составляет 26 мм, а у моста, имеющего ширину полоска 5 мм, – 25,5 мм.

С целью экспериментальной проверки был изготовлен квадратурный мост с найденными выше размерами. На рисунке 4 показана зависимость КСВ портов изготовленного моста от частоты, полученная экспериментально (кривые б, в). Анализируя зависимости КСВ портов, полученные после настройки модели моста в *Microwave Office* (рисунок 4, кривая а), и соответствующую ей экспериментальную зависимость (рисунок 4, кривая г) отметим, в окрестностях рабочей частоты оптимизированного моста наблюдается существенное уменьшение коэффициента стоячей волны, что свидетельствует об улучшении характеристик моста.

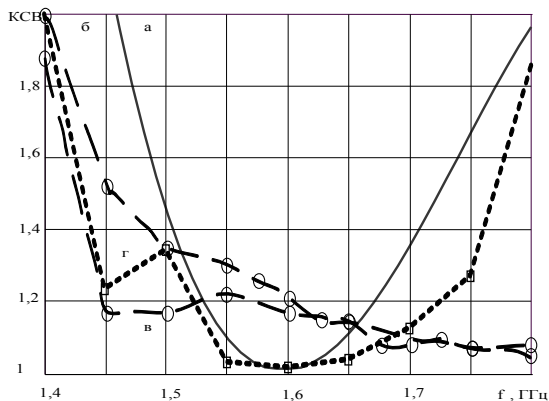


Рисунок 4 – Расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента стоячих волн портов моста от частоты

Оценим требуемую точность изготовления СВЧ узлов гомодинного преобразователя. Максимальные требования предъявляются к точности изготовления наиболее узкополосных устройств, поскольку отклонение их характеристик вносит наибольший вклад в погрешность гомодинного преобразователя. В нашем случае такими устройствами являются микрополосковые антенны. Они представляют собой весьма узкополосные устройства (рабочая полоса частот составляет 2,5 %) от центральной частоты (40 МГц на частоте 1600 МГц). Экспериментально было установлено, что при изменении размера b антенны (см. рисунок 1) на 0,5 мм частота ее настройки смещается на 25 МГц. Например, для того, чтобы отклонение резонансной частоты микрополосковой антенны от центральной частоты рабочего диапазона не превышало ± 8 МГц, что составляет $\pm 0,5$ % от центральной частоты рабочего диапазона, погрешность ее изготовления должна быть не более $\pm 0,16$ мм. Точность расположения точки подвода питания антенны должна быть не менее точности изготовления, поскольку от нее зависит входное сопротивление и КСВ антенны.

Сравнивая характеристики узлов до и после корректировки их размеров с применением *Microwave Office*, следует отметить существенное улучшение их характеристик. Методика проектирования узлов СВЧ, рассмотренная в данной работе, позволяет существенно повысить точность расчета и сократить сроки изготовления полосковых узлов, а также производить оптимизацию их параметров по требуемому критерию.

Планируется дополнить данную методику процедурой определения величины отклонения характеристик микрополосковых узлов СВЧ в зависимости от погрешности изготовления на этапе проектирования, что составит перспективу дальнейших исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Зиборов С.Р. Гомодинный СВЧ измеритель влажности многокомпонентной смеси/ С.Р. Зиборов, И.Б. Широков, С.Н. Поливкин // Вест. СевГТУ. Информатика, электроника, связь: Сб. науч. тр. — Севастополь 2006. — Вып.74. — С.154–163.
2. Антенны и устройства СВЧ (Проектирование фазированных и антенных решеток): Учеб. пособие для вузов/ Д.И. Воскресенский, Р.А. Грабовская, Н. С. Давыдова; Под ред. Д.И. Воскресенского. — М.: Радио и связь, 1981. — 432 с.
3. Панченко Б.А. Микрополосковые антенны/ Б.А. Панченко, Е.И. Нефедов. — М.: Радио и связь, 1986. — 144 с.
4. Микроэлектронные устройства СВЧ: Учеб. пособие для радиотехнических специальностей вузов/ Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров, Ю.Н. Алехин; Под ред. Г. И. Веселова. — М.: Высш. шк., 1988. — 280 с.

Поступила в редакцию 9.12.2005 г.