

Математическое моделирование и экспериментальное исследование микрополосковых фазовращателей на основе одиночной линии передачи со ступенчатым шлейфом

В.П. Мещанов¹, К.А. Саяпин², Д.Н. Шерстюков³

¹НПП «НИКА-СВЧ»

²Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

³Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

Аннотация: в данной работе была разработана схмотехническая модель микрополоскового фазовращателя на основе одиночной ступенчатой линии передачи со ступенчатым короткозамкнутым шлейфом и проведено его теоретическое и экспериментальное исследование. Измерение электрических характеристик 90°-фазовращателей показало отклонение фазочастотной характеристики (ФЧХ) от номинального значения не более чем на 1,2° в диапазоне частот 2...4 ГГц, максимальное значение КСВН не превысило 1,2. Полученные результаты исследований позволили сделать заключение о возможности реализации широкополосных устройств фазового смещения радиосигналов предложенной топологии на микрополосковой линии передачи.

Ключевые слова: фазовращатель, линия передачи, микрополосковая линия, сверхвысокие частоты

1. Введение

Среди многообразия известных структур широкополосных фиксированных фазовращателей (ФФ) наиболее простыми с технологической точки зрения являются фазовращатели с фазосдвигающим каналом (ФК) на основе одиночных линий передачи (ЛП) со шлейфом [1-7]. К ним, в частности, относятся структуры на ступенчатых [4, 5] и плавных [6] линиях передачи с однородными короткозамкнутыми шлейфами. Исследованная авторами в работе [8] структура отличается от [4-6] применением в ней ступенчатого шлейфа, что, как показал анализ в приближении Т-волн, позволяет обеспечить меньшие габариты устройства по сравнению с указанными аналогами при сопоставимых частотных характеристиках. При этом, изменяя начальные приближения, удалось получить два оптимальных решения задачи синтеза, отличающихся закономерностями изменения волнового сопротивления ЛП.

Однако рассмотренные в работе [8] фазовращатели в приближении Т-волн не могут быть рекомендованы для реализации на микрополосковой ЛП, поскольку одноволновое приближение не учитывает дисперсию электромагнитных волн и неоднородности в местах сочленения ЛП.

Целью данной работы является математическое моделирование и экспериментальное исследование микрополосковой реализации фиксированного фазовращателя с фазосдвигающим каналом на основе одиночной ступенчатой линии передачи с короткозамкнутым ступенчатым шлейфом.

2. Схмотехническое моделирование

На основе двух типов решений задачи параметрического синтеза в приближении Т-волн, полученных авторами в работе [8] для случая $\varphi = 45^\circ$, $\kappa = 2$, разработаны

фазовращатели на микрополосковой линии передачи для рабочего диапазона частот 2...4 ГГц. Их схемотехническая модель представлена на рисунке 1. В качестве подложки микрополосковой ЛП задан ламинат Rogers RO4003C с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3,55$, толщиной $h = 0,813$ мм и тангенсом угла диэлектрических потерь $tg\delta = 0,0027$, толщина двухсторонней металлизации $t = 18$ мкм.

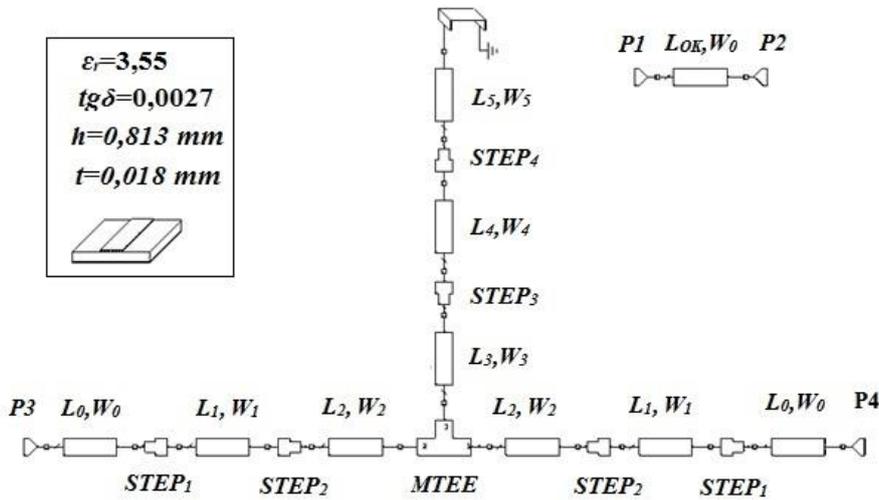


Рисунок 1. Схемотехническая модель трехступенчатого фазовращателя на микрополосковой линии передачи.

Анализ полученной схемотехнической модели выполнялся в программе AWR Microwave Office. Следует отметить, что в схемотехнической модели учитывались особенности распространения электромагнитных волн в средах с неоднородным диэлектрическим заполнением, а также влияние скачков волнового сопротивления в местах сочленения отрезков ЛП с различными геометрическими размерами (элементы $STEP_1$ - $STEP_4$) и неоднородностей, локализованных в месте соединения центрального отрезка ЛП со шлейфом (элемент $MTEE$). Это привело к тому, что частотные характеристики микрополосковой модели несколько ухудшились по сравнению с моделью в приближении Т-волн: так, значение КСВН превысило 1,7, а отклонение ФЧХ от номинала составило более 10° , тогда как для модели в приближении Т-волн эти параметры составляли не более 1,2 и 1° соответственно. Для коррекции частотных характеристик дополнительно была решена задача параметрической оптимизации, поставленная в виде чебышевской аппроксимации:

$$\min_{\overline{AM}} \max_{f \in [2\text{ГГц}, 4\text{ГГц}]} \left| \varphi_0 - \varphi(f, \overline{AM}) \right|,$$

$$\min_{\overline{AM}} \max_{f \in [2\text{ГГц}, 4\text{ГГц}]} KCBH(f, \overline{AM}),$$

где $\varphi(f, \overline{AM})$ – ФЧХ фазовращателя; $KCBH(f, \overline{AM})$ – коэффициент стоячей волны по напряжению плеч фазосдвигающего канала; $\overline{AM} = L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_{OK}, W_1, W_2, W_3, W_4, W_5$ – вектор варьируемых параметров, включающий длины $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_{OK}$ и ширину W_1, W_2, W_3, W_4, W_5 отрезков ЛП (рисунок 1). Решение задачи осуществлялось с помощью симплексного метода оптимизации (метод Нелдера-Мида) в программном

пакете AWR Microwave Office.

Для первого типа ФФ отклонение ФЧХ от номинального значения не превышает $0,5454^\circ$, а $KСВН_{макс}$ составляет 1,0578; для второго типа ФФ эти параметры составляют $0,5088^\circ$ и 1,0642 соответственно.

Таким образом, проведение параметрической оптимизации микрополосковой схемотехнической модели позволило получить частотные характеристики ФФ первого и второго типов, наиболее близкие к характеристикам соответствующих моделей в приближении Т-волн.

3. Электродинамическое моделирование и экспериментальные результаты

Для уточнения полученных результатов схемотехнического моделирования построены 2,5D-модели ФФ (рисунок 2) и проведено их электродинамическое моделирование в планарном электромагнитном симуляторе AWR AXIEM пакета AWR DE с помощью метода моментов. На рисунке 4 представлены полученные частотные характеристики ФФ с ФК первого типа, а на рис. 5 – характеристики ФФ с ФК второго типа. Длина устройств L в обоих случаях составляет 45 мм.

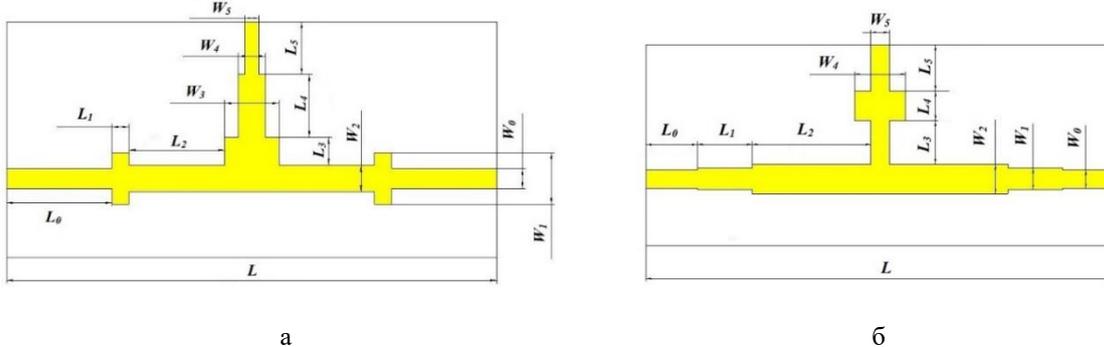


Рисунок 2. Топология электродинамических моделей ФК первого (а) и второго (б) типов.

Для экспериментальной проверки достоверности полученных результатов были изготовлены опытные образцы фазовращателей первого и второго типов. В качестве материала подложки использован заданный при синтезе ламинат Rogers RO4003С ($\epsilon_r = 3,55$, $h = 0,813$ мм, $tg\delta = 0,0027$, $t = 18$ мкм). Формирование топологии ФК производилось методом химического травления в растворе хлорного железа. Изготовленные ФК фазовращателей, помещенные в контактное устройство, включающее в себя два коаксиально-микрополосковых перехода с коннекторами типа SMA и держатель печатной платы, представлены на рисунках 3а и 3б. Для измерения их электрических параметров использовался векторный анализатор цепей (ВАЦ) «Rohde&Schwarz» ZVA-40. Двухпортовая TOSM-калибровка ВАЦ осуществлялась с помощью коаксиального калибровочного набора «Микран» НКММ-03-03Р в канале сечением 3,5/1,52 мм [11].



Рисунок 3. Фазосдвигающие каналы первого (а) и второго (б) типа в измерительной оснастке.

Результаты экспериментального исследования ФФ первого типа приведены на рисунке 4. В этом случае максимальное значение КСВН составляет 1,17, отклонение ФЧХ от номинального значения фазового сдвига не превышает $1,16^\circ$.

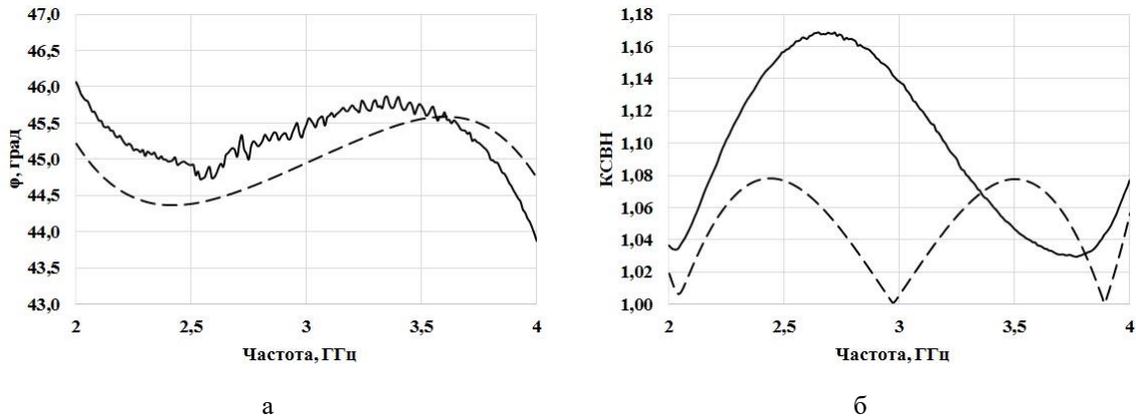


Рисунок 4. Частотные характеристики ЕМ-модели (пунктирная линия) и экспериментального образца (сплошная линия) ФФ первого типа: а) ФЧХ; б) КСВН портов ФК.

Экспериментальные частотные характеристики ФФ второго типа приведены на рисунке 5. Здесь максимальное значение КСВН не превышает 1,11, а отклонение ФЧХ от номинального значения фазового сдвига составляет $1,1^\circ$.

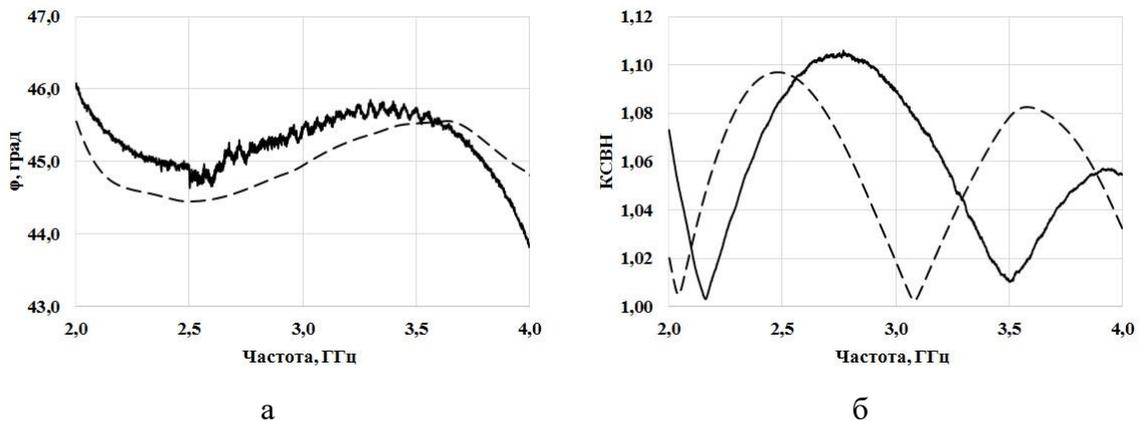


Рисунок 5. Частотные характеристики ЕМ-модели (пунктирная линия) и экспериментального образца (сплошная линия) ФФ второго типа: а) ФЧХ; б) КСВН портов ФК.

Незначительные расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами объясняются в первую очередь потерями, вносимыми коаксиально-микроразветвляющимися переходами, и технологическими допусками при изготовлении.

3. Заключение

Численное и экспериментальное исследование микроразветвляющихся фиксированных фазовращателей с фазосдвигающим каналом на основе одиночной ступенчатой линии передачи со ступенчатым шлейфом для рабочего частотного диапазона 2...4 ГГц, разработанных на основе решений в приближении Т-волн для случая $\varphi_0=45^\circ$, $\kappa=2$, показало, что предлагаемые структуры обладают приемлемыми частотными характеристиками, находящимися на уровне аналогов, при значительно меньших габаритных размерах. Практическая реализация предлагаемых устройств не осложнена технологическими трудностями.

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности использования ступенчатых шлейфов в структуре микроразветвляющихся ФФ.

Список литературы

1. Schiffman B.M. A new class of broad-band microwave 90-degree phase shifters // IRE Trans. – 1958. – V. MTT-6. – No. 4. – P. 232-237.
2. Wilds R.B. Try $\lambda/8$ stubs for fast fixed phase shifts // Microwave & RF. – 1979. – Vol. 6. – No. 12. – P. 67-68.
3. Алексеев А.Н., Аристархов Г.М. Широкополосные дифференциальные фазовращатели СВЧ на основе одиночных линий передачи // Радиотехника и электроника. – 1988. – Т. 33. - № 1. – С. 63-69.
4. Губин Д.С. и др. Синтез фазовращателей на основе ступенчатой одиночной линии передачи со шлейфом // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55. – № 2. – С. 162-167.
5. Губин Д.С. и др. Синтез фазовращателей на основе ступенчатой одиночной линии передачи класса II со шлейфом. // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49. - № 7. – С. 801-805.
6. Базлов Н.Н. и др. Сверхширокополосные фазовращатели на основе плавной неоднородной одиночной линии передачи // Антенны. – 2011. – № 1. – С. 37-43.
7. Jian-Xiao Wang et al. Design of a Wideband Differential Phase Shifter with the Application of Genetic Algorithm // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2014. – Vol. 48. P. 45-49.
8. Алексеев В.В. и др. Исследование фиксированных фазовращателей на основе одиночной ступенчатой линии передачи со ступенчатым шлейфом // Радиотехника. – 2019. – Т 83. – № 7 (10). – С. 66-72.
9. Маттей Г.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. В 2-х т. – М.: Связь, 1972.
10. Фуско В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование / В. Фуско; Перевод с англ. А. А. Вольман, А. Д. Муравцова; Под ред. В. И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1990.
11. Наборы переходов коаксиальных [Электронный ресурс] // АО «НПФ «Микран». URL: https://www.micran.ru/productions/Accessory/sets/set_of_connectors/ (дата обращения: 06.03.2021).