

Проектирование линейки фазовращателей на планарных сосредоточенных элементах для диапазона ДМВ

П. А. Власов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

pavel.rute@mail.ru

Аннотация. Спроектирована линейка фазовращателей на подложке из сапфира со сдвигами фазы от -80° до 80° с шагом 20° в виде Т- и П-образных звеньев цепи на планарных сосредоточенных элементах для диапазона дециметровых длин волн. Учтены паразитные параметры элементов и приведены результаты электромагнитного моделирования, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными.

Ключевые слова: фазовращатель; сосредоточенные элементы; пассивные элементы; сапфир

I. ВВЕДЕНИЕ

Фазовращатели являются двухпортовыми устройствами, предназначенными для изменения фазы проходящего через них сигнала на заданную величину. Они находят применение в качестве ключевых элементов в составе систем с фазированной антенной решеткой (ФАР) для настройки направления антенного луча, используются для линеаризации мощных усилителей, в системах радиолокации и для тестирования радиооборудования [1–2]. Простейшим фазовращателем, который обеспечивает фиксированное значение фазового сдвига на заданной частоте f , является отрезок линии передачи. Любой отрезок линии передачи можно охарактеризовать электрической длиной θ и волновым сопротивлением Z_0 . Первая величина, связанная с физической длиной отрезка l , отражает изменение фазы волны при прохождении через всю его длину. Электрическая длина θ как правило измеряется в градусах и определяется по формуле:

$$\theta = \beta l = 2\pi \frac{lf}{c} \sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}, \quad (1)$$

где β – фазовая постоянная, $\epsilon_{\text{эфф}}$ – эффективная относительная диэлектрическая проницаемость подложки. Электрическая длина совпадает по величине с вносимым отрезком фазовым сдвигом $\Delta\varphi$, но имеет противоположный знак. Из формулы (1) следует, что электрическая длина отрезка пропорциональна частоте, что означает, что для достижения тех же значений фазового сдвига с уменьшением частоты требуемая фактическая длина отрезка l должна расти. На низких частотах, в частности в диапазоне дециметровых длин волн (ДМВ), отрезок большой длины может оказаться практически нереализуем, поэтому разумнее произвести его замену на компактный аналог на сосредоточенных элементах.

II. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Длинную линии передачи, являющейся элементом с распределенными параметрами, всегда можно представить в виде искусственной длинной линии, состоящей из последовательно соединенных звеньев цепи на основе элементов с сосредоточенными параметрами. Отрезок линии передачи с волновым сопротивлением Z_0 и электрической длиной θ удобно заменить эквивалентной ему на заданной частоте ω_0 схемой в виде каскадного соединения Т- или П-образных звеньев [3]. В случае отсутствия потерь звено состоит из трех реактивных элементов, каждое из которых является фильтром нижних (ФНЧ) либо верхних частот (ФВЧ) [4]. Условие эквивалентности характеристик схемы и отрезка линии передачи выполняется строго для одной частоты, однако число звеньев в схеме определяет ширину диапазона частот, в котором подобие их характеристик сохраняется.

Для замены коротких отрезков с $|\theta| \leq 90^\circ$ обычно достаточно лишь одного звена цепи. Стоит отметить, что использование звеньев на основе ФВЧ позволяет получить искусственные отрезки линий передачи с отрицательной электрической длиной ($\theta < 0^\circ$) или же с отрицательной дисперсией (ЛПОД), аналог которого в виде элемента с распределенными параметрами невозможно воспроизвести в реальности [5]. В табл. 1 представлены все виды звеньев ФНЧ и ФВЧ на основе сосредоточенных элементов, выполняющих функции фазовращателей, и формулы расчета индуктивности L и емкости C для каждого типа звена и требуемого фазового сдвига $\Delta\varphi = -\theta$.

Поскольку П- и Т-образные звенья эквивалентны друг другу, то для проектирования линейки фазовращателей следует выбрать тот тип звена, что обеспечивает наименьшие габариты устройства. Большой компактности, а также точности и воспроизводимости характеристик фазовращателей, позволяет добиться использование планарных сосредоточенных элементов, таких как встречно-штыревые конденсаторы и планарные катушки индуктивности. Для минимизации размеров конденсаторов, с одной стороны, следует выбрать материал подложки с как можно большей относительной диэлектрической проницаемостью ϵ и малыми диэлектрическими потерями, с другой стороны, это приведет к значительному росту паразитной емкости катушек, расположенных на той же подложке.

ТАБЛИЦА 1. ЭЛЕМЕНТЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ОТРЕЗКА ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Электрическая длина отрезка	$0 \leq \theta \leq 90^\circ$		$-90^\circ \leq \theta \leq 0$	
	Схема звена			
Вид звена	П-звено	Т-звено	П-звено	Т-звено
Формула расчета	$L = \frac{Z_0 \sin \theta }{\omega_0}$ $C = \frac{1}{\omega_0 Z_0} \operatorname{tg} \left \frac{\theta}{2} \right $	$L = \frac{Z_0 \operatorname{tg} \left \frac{\theta}{2} \right }{\omega_0}$ $C = \frac{1}{\omega_0 Z_0} \sin \theta $	$L = \frac{Z_0 \operatorname{ctg} \left \frac{\theta}{2} \right }{\omega_0}$ $C = \frac{1}{\omega_0 Z_0 \sin \theta }$	$L = \frac{Z_0}{\omega_0} \frac{1}{\sin \theta }$ $C = \frac{1}{\omega_0 Z_0} \operatorname{ctg} \left \frac{\theta}{2} \right $

На роль материала подложки для данной задачи подходит монокристаллический сапфир с $\epsilon=10$, $\operatorname{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-4}$ и толщиной $h = 300$ мкм. Поскольку габариты фазовращателей в первую очередь определяются размерами и числом встречно-штыревых конденсаторов, то для достижения положительных сдвигов фазы разумнее использовать П-звено ФВЧ, а для отрицательных сдвигов – Т-звено ФНЧ, требующих в составе лишь один конденсатор. Для формирования линейки фазовращателей со сдвигом фазы с шагом 20° по формулам, приведенным в табл. 1, рассчитаны номиналы элементов L и C , которые затем были откорректированы для компенсации влияния паразитных параметров: параллельной емкости для катушек и последовательной индуктивности для конденсаторов [6]. Всего созданы 4 топологии ФВЧ со сдвигами 20° , 40° , 60° и 80° и 4 топологии ФНЧ со сдвигами -20° , -40° , -60° и -80° для рабочей частоты 434 МГц. На рис. 1 изображены зависимости фазового сдвига от частоты всех моделей фазовращателей.

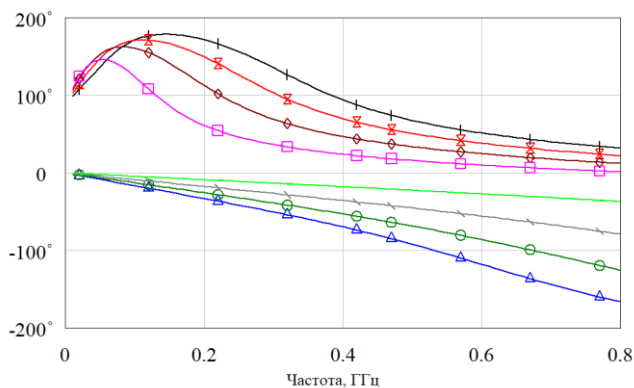


Рис. 1. Частотные зависимости фазовых сдвигов моделей фазовращателей

На рис. 2 в качестве примера изображена топология одного из фазовращателей с $\theta = 60^\circ$, обеспечивающего фазовый сдвиг -60° , выполненного на основе Т-образного звена. Габариты всех устройств линейки не превышают $5,1 \times 4,7$ мм. При этом предусмотрена возможность установки фазовращателей методом Flip-Chip на универсальное посадочное место на измерительной плате. На рис. 3 показаны S-параметры данного фазовращателя, полученные в результате электромагнитного моделирования и в результате измерений. Измеренный сдвиг фазы с вычетом

подводящих линий составил $-56,7^\circ$, что отличается от требуемого на 5,5 %.

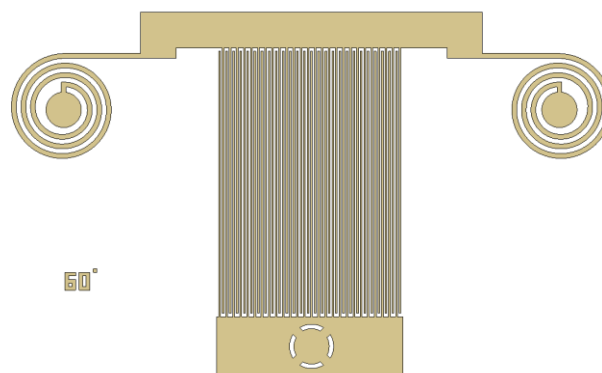


Рис. 2. Топология фазовращателя с фазовым сдвигом -60°

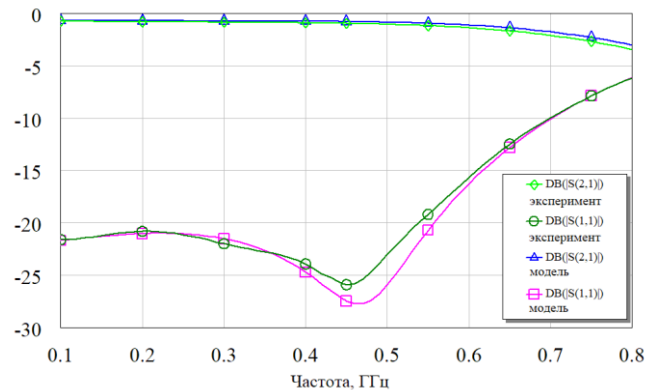


Рис. 3. S-параметры фазовращателя с фазовым сдвигом -60°

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем перехода от громоздких отрезков линии передачи – элементов с распределенными параметрами – к звеньям цепи на сосредоточенных элементах получена линейка компактных фазовращателей, обеспечивающих фиксированный сдвиг фазы в диапазоне от -80° до 80° с шагом 20° , предназначенных для работы в диапазоне ДМВ. По результатам проведенных измерений можно заключить о корректности характеристик моделей. Наличие расхождения между экспериментальными и моделируемыми данными вызвано влиянием измерительной платы и подводящих линий, а также погрешностью самих измерений, однако при этом не является значительным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кочемасов В., Шадский В. Твердотельные СВЧ-фазовращатели часть 1 // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2017. вып. 1. С. 86-100.
- [2] Sengul M. High-pass/low-pass section design for 0° – 360° lumped-element phase shifters via the real frequency technique // Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences. 2017. iss. 25. P. 1922-1931.
- [3] Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
- [4] Летавин Д.А. Разработка компактного фазовращателя дециметрового диапазона длин волн // Ural Radio Engineering Journal. 2023. вып. 7. С. 441–456.
- [5] Вендик И.Б., Вендик О.Г. Метаматериалы и их применение в технике сверхвысоких частот (Обзор). // Журнал технической физики. 2013. Т. 80, вып. 1. С. 3-28.
- [6] Bahl I.J. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits. Boston, London: Artech House, 2003. 488 p.