

УДК 621.372

## НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВОЙ КМОП-ТЕХНОЛОГИИ

Ражева К.В. (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

Научный руководитель – к.т.н. Румянцев И.А. (Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

### Аннотация

Целью работы являлась разработка направленного квадратурного ответвителя. Было проведено моделирование четырех различных реализаций схем ответвителей на идеальных и реальных сосредоточенных элементах из библиотеки кремниевой КМОП-технологии с разрешением 0,18 мкм, разработаны топологии, проведена оптимизация параметров схем для компенсации паразитных параметров элементов, исследовано влияние температуры и разброса параметров элементов на характеристики схемы. На основе полученных результатов было проведено сравнение всех представленных схем ответвителей и была выбрана преимущественная схема.

### Введение.

Системы 5G увеличивают пропускную способность сети по сравнению с технологиями 4G, что позволяет обеспечить большую доступность широкополосной мобильной связи, повышает надежность систем коммуникаций между устройствами, уменьшает время задержки, повышает скорость передачи данных, обеспечивает меньший расход энергии батарей. Возможно использование частот как ниже 6 ГГц (в основном в диапазонах 3,3–4,2 ГГц и 4,5–5,0 ГГц), так и выше 6 ГГц (предполагаемые диапазоны 24,25–27,50 ГГц, 37,5–43,50 ГГц и более высокие). В России на частотах ниже 6 ГГц предполагается использование диапазона 4,80–4,99 ГГц. Для достижения данных характеристик применяются активные фазированные антенные решетки, которые позволяют пользовательскому устройству «нацеливать» диаграмму направленности на антенну базовой станции и наоборот. Для реализации активных фазированных антенных решеток, используются приемопередающие модули. Их ключевым элементом является фазовращатель, позволяющий изменять фазу входного сигнала в зависимости от внешних управляющих сигналов. При реализации в интегральном исполнении фазовращатели делятся на несколько типов: векторный, распределенный, коммутируемый и отражательный. Отражательный тип является предпочтительным, так как имеет более широкий диапазон контроля фазы, низкие шумы, а также нулевую потребляемую мощность. Направленный ответвитель является одним из основных элементов отражательного фазовращателя и позволяет ответвлять и передавать в определенном направлении часть электромагнитной энергии. По принципиальному устройству можно разделить направленные ответвители на две группы: ответвители с распределенной электромагнитной связью и ответвители на отрезках линий передач. Ответвители с распределенной электромагнитной связью представляют собой две неизолированных линии передачи, расположенные близко друг к другу, из-за чего происходит взаимодействие электромагнитных полей. Но такие ответвители имеют большие габариты на высоких частотах по сравнению с ответвителями на отрезках линий передач. В настоящее время наиболее распространенным решением является использование шлейфных ответвителей.

### Основная часть.

В данной работе представлены четыре возможных реализации квадратурных шлейфных ответвителей на сосредоточенных элементах. Предварительно был произведен расчет номиналов элементов на частоте 4,9 ГГц для каждой схемы при сопротивлении портов равном 50 Ом. Сначала были построены схемы с использованием идеализированных элементов и было проведено компьютерное моделирование, результатом которого являются

S-параметры, а также амплитудная и фазовая ошибки. Следующий шаг – замена идеальных элементов реальными из библиотеки кремниевой КМОП-технологии с разрешением 0,18 мкм, в которых реальные элементы конденсаторов и индуктивностей представлены при помощи эквивалентных схем замещения. Также было проведено компьютерное моделирование. Таким образом, при замещении идеализированных элементов на реальные из библиотеки кремниевой технологии с разрешением 0,18 мкм произошло ухудшение характеристик вследствие влияния паразитных параметров элементов. Данные ошибки были скомпенсированы корректировкой номиналов конденсаторов и индуктивностей при помощи проведения параметрического анализа. После выполнения оптимизации результаты приблизились к полученным при моделировании схемы на идеальных элементах. На основе разработанных схем на сосредоточенных элементах были разработаны топологии кристаллов направленных ответвителей. Используемые при разработке топологии проводники имеют паразитные параметры. В данной модели учитываются только резистивные и емкостные параметры схемы, а параметры индуктивного характера остаются вне рассмотрения. Для учета паразитных параметров топологии номиналы элементов вновь были скорректированы при помощи параметрического анализа. Было исследовано влияние разброса параметров элементов при реализации. При данном анализе были рассмотрены следующие случаи: типовое значение конденсатора и среднее значение индуктивности, а также все комбинации из минимального, максимального и типичного значения индуктивностей и конденсаторов. Также был проведен анализ влияния температуры в диапазоне от -40 °С до 85 °С на параметры схем.

#### **Выводы.**

В данной работе был произведен расчет и моделирование схемы направленного квадратурного ответвителя на идеальных и реальных сосредоточенных элементах из библиотеки КМОП-технологии с разрешением 0,18 мкм. В результате всех проведенных исследований была выбрана наиболее оптимальная схема. После компенсации паразитных параметров, выявленных после проведения топологии, наилучшим результатом по амплитудной ошибке как на центральной частоте, так и на граничных оказывается схема с площадью кристалла равной 0,92 мм<sup>2</sup>. На частоте 4,9 ГГц ошибка по амплитуде составляет -0,02 дБ, а на частотах 4,8 ГГц и 5 ГГц – -0,14 и 0,05 соответственно. При этом ошибка по фазе в наихудшем случае в диапазоне рабочих частот равна 1 градус. Данная схема также обладает наибольшей устойчивостью к разбросу параметров при реализации. Разброс ошибки по амплитуде составляет 0,7 дБ, параметры  $S_{12}$  и  $S_{13}$  в наихудшем случае имеют наименьшую разницу в значениях, а также в наихудшем случае достигаются наименьшие потери – 2,6 дБ. Также было оценено влияние температуры и разброса параметров элементов. Было выявлено, что температурный разброс вносит незначительные изменения, а максимальный разброс характеристик при изменении температуры составляет не более 0,1 дБ. В дальнейшем на основе данного устройства возможна реализация отражательного фазовращателя.

Ражева К.В. (автор)

Подпись

Румянцев И.А. (научный руководитель)

Подпись