

УДК

# Микрополосковый аналоговый фазовращатель с малыми потерями для миллиметрового диапазона волн

А.С. Поляков

АО «НПП «Радар ммс»

**Аннотация:** В настоящей работе представлены анализ и корректировка известной схемы компактного микрополоскового фазовращателя на варакторных диодах в части альтернативного включения диодов в схему. Корректировка обусловлена необходимостью уменьшения потерь, что обеспечит изготовление фазовращателей, реализованных по предложенной схеме, с более высоким показателем качества для миллиметрового диапазона волн. Результаты компьютерного моделирования фазовращателя в Ка-диапазоне подтвердили увеличение показателя качества, а также уменьшение неравномерности амплитуды коэффициента передачи.

**Ключевые слова:** микрополосковый аналоговый фазовращатель, миллиметровый диапазон, варакторные диоды.

## 1. Введение

В настоящее время немалое внимание уделяется микрополосковым аналоговым фазовращателям сантиметрового и миллиметрового диапазона волн, использующих варакторные диоды (диоды с переменной емкостью) в качестве фазоуправляющих устройств. Интерес к этой технологии обусловлен с одной стороны преимуществом аналоговых фазовращателей перед дискретными за счет их более высокой компактности и меньших вносимых потерь, а с другой - более высоким быстродействием по сравнению с фазовращателями, реализованными на микроэлектромеханических структурах (МЭМС) или на ферритах. Эти достоинства позволяют данному типу фазовращателей находить свое применение в составе фазированных антенных решеток с широкими углами сканирования и высокой скоростью перемещения лучом диаграммы направленности. К настоящему времени известны изготовленные образцы данного типа фазовращателей [1, 2].

Варактор это полупроводниковый диод, у которого значение емкости объемного заряда р-п перехода может меняться в зависимости от величины приложенного к нему постоянного напряжения [3]. Помимо полезной переменной управляемой емкости  $C_j$  у варактора также имеются паразитные параметры, такие как параллельная емкость корпуса  $C_p$ , последовательная индуктивность выводов  $L_p$ , нелинейное сопротивление перехода  $R_j$  и активное сопротивление эпитаксиального слоя  $R_s$ , свободного от области объемного заряда. Эти параметры ухудшают характеристики диода, что особенно заметно в миллиметровом диапазоне волн. На рисунке 1 приведена эквивалентная электрическая схема варакторного диода.

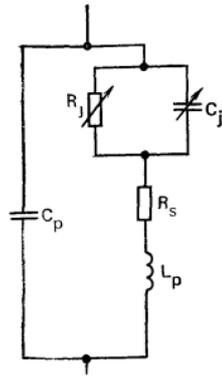


Рисунок 1. Эквивалентная электрическая схема варакторного диода

Варакторные диоды, работающие в миллиметровом диапазоне, как правило реализованы в бескорпусном исполнении, и паразитная емкость корпуса  $C_p$  соответственно исключается из эквивалентной схемы. С другой стороны, данные варакторы, к сожалению, обладают более высоким значением паразитного активного сопротивления  $R_s$  по сравнению с варакторами сантиметрового диапазона, что приводит к росту активных потерь проходного СВЧ-сигнала. Так средние измеренные значения активного сопротивления варакторов  $R_s$ , изготовленных по GaAs-технологии для X-диапазона составляют 3-4 Ома, для Ku-диапазона – 4-5 Ом, для Ka-диапазона – 7-8 Ом соответственно.

## 2. Описание исходной схемы фазовращателя

Разработчиками в последние несколько лет были предложены компактные схемы микрополосковых фазовращателей, позволившие отказаться от более громоздкой традиционной схемы на основе гибридного ответвителя и варакторов, используемых в качестве отражательных реактивных нагрузок, подключаемых к двум плечам ответвителя [4]. На рисунке 2 приведены топология (слева) и электрическая схема (справа) компактного микрополоскового фазовращателя С-диапазона на основе полуволновой петли связи [5]. Дополнительную компактность схемы обеспечивает компоновка полуволновой петли в виде четвертьволнового отрезка на связанных линиях передачи. Последовательная цепочка из двух варакторных диодов вверху на топологии соответствует переменной емкости  $C_1$  на схеме и равной по значению  $C_v/2$ , а короткозамкнутый варактор внизу на топологии – переменной емкости  $C_2$ , равно по значению  $C_v$ . Обозначения  $R$  и  $C_{DCB}$  на схеме соответствуют резистору и разделительному конденсатору соответственно.

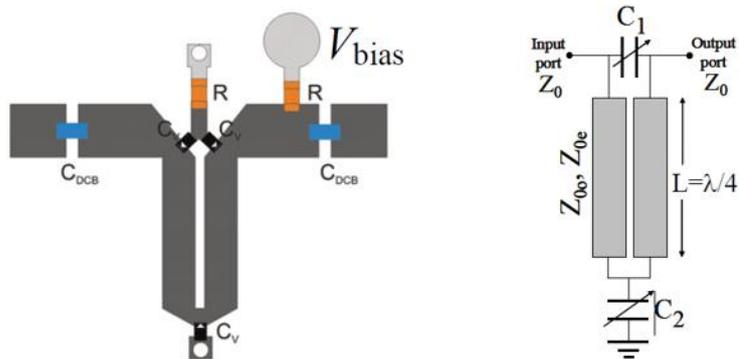


Рисунок 2. Топология и схема ФВ на связанных линиях передачи

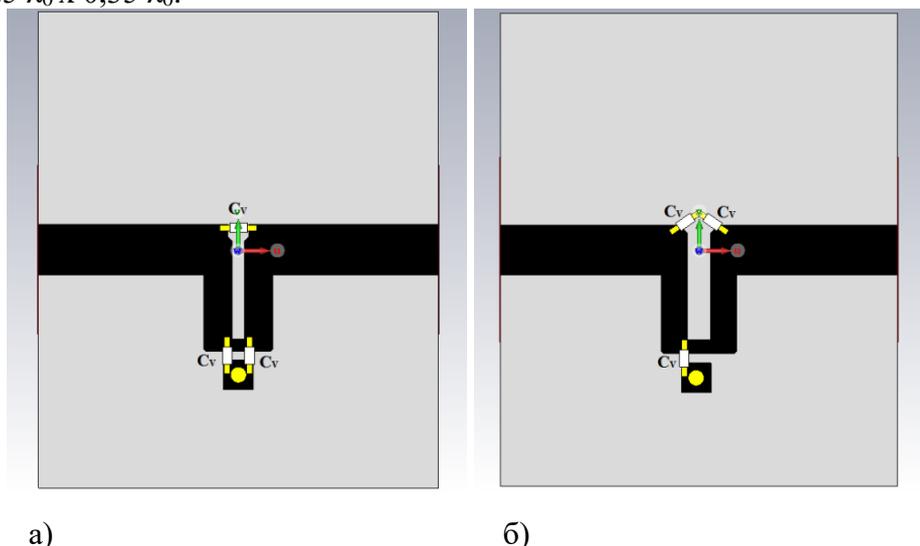
Отношение емкостей  $C_2/C_1 = 2$  при 70-омной связанной линии передачи  $Z_{0e}$  обеспечивает согласование устройства с 50-омными подводными линиями  $Z_0$ . Формула, описывающая условие согласования, приведена ниже.

$$C_2 = 4 \cdot \left( \frac{Z_0}{Z_{0e}} \right)^2 \cdot C_1$$

Включение варакторов в соответствии с топологией рисунка 2 ограничивает возможности применения схемы фазовращателя с ростом рабочей частоты по причине увеличения потерь на паразитных последовательных сопротивлениях  $R_s$  диодов.

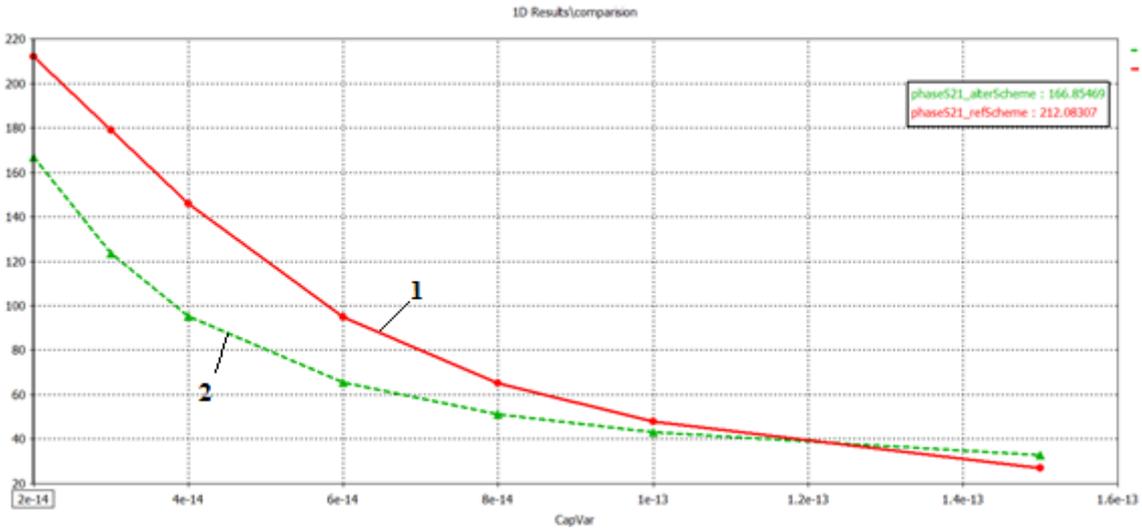
### 3. Результаты моделирования исходной и альтернативной схем фазовращателя

В работе предлагается альтернативное включение варакторных диодов в данную схему для снижения потерь и увеличения показателя качества фазовращателя соответственно. Для этого последовательная цепочка варакторов, соответствующая обозначению  $C_1$  на схеме, заменяется одним варактором, а короткозамкнутый варактор, соответствующий  $C_2$  на схеме, заменяется двумя диодами, включенными параллельно. При таком включении согласование в схеме обеспечивается, так как отношение емкостей  $C_2/C_1 = 2$  сохраняется. На рисунке 3а представлена модель такого микрополоскового фазовращателя Ka-диапазона длин волн, спроектированная в программе CST Studio Suite [6]. Модель выполнена на подложке толщиной 0,25 мм и с относительной диэлектрической проницаемостью равной 3,0. Модель варактора представляет собой металлические балочные выводы (контакты), между которыми включены последовательно активное сопротивление равное 7 Ом и переменная емкость р-п перехода. Для моделирования выбраны сопротивление и диапазон переменной емкости от 0,02 до 0,15 пФ (дискретные точки 0,02; 0,03; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1; 0,15 пФ), характерные для данного диапазона волн. На рисунке 3б приведена модель исходного фазовращателя для того же диапазона волн и параметров подложки. Поперечные размеры функциональной области каждой из моделей составляют не более  $0,25 \lambda_0 \times 0,35 \lambda_0$ .

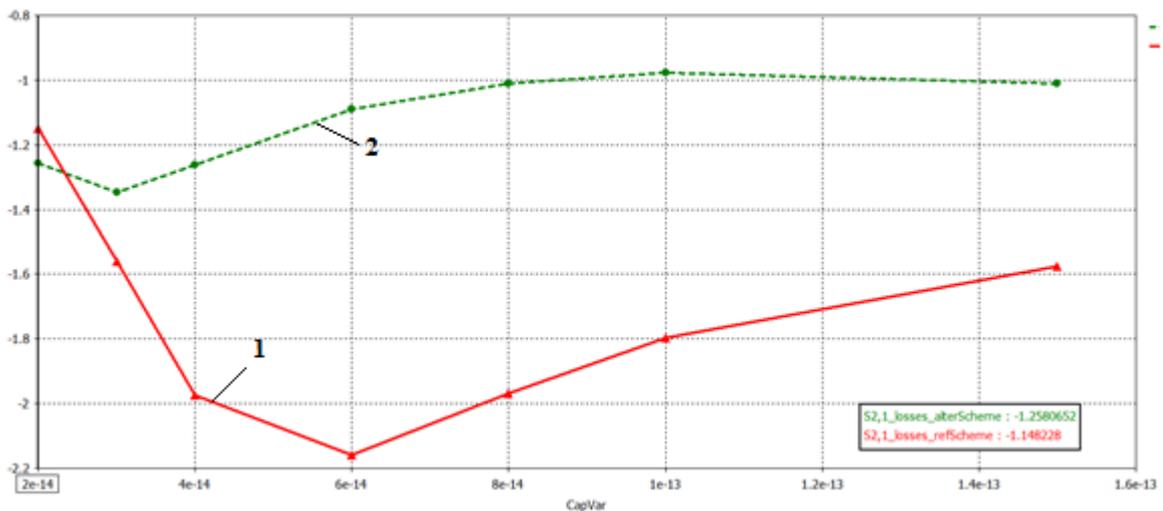


**Рисунок 3.** Модель фазовращателя для Ka-диапазона: а - с альтернативным; б - с исходным способом включения варакторов в схему

На рисунках 4 и 5 приведены зависимости фаз и амплитуд коэффициентов передачи (КП) обеих моделей фазовращателей от емкости варакторов на центральной рабочей частоте.



**Рисунок 4.** Фазо-емкостные характеристики КП для двух способов включения: 1 – исходная модель, 2 – с альтернативным способом включения варакторов



**Рисунок 5.** Амплитудно-емкостные характеристики КП для двух способов включения: 1 – исходная модель, 2 – с альтернативным способом включения варакторов

В таблице ниже приведены основные результаты моделирования обоих способов включения диодов в схему для центральной рабочей частоты.

**Таблица.** Сравнение характеристик моделей

Способ включения варакторов в схему	Мах фазовый набег $\varphi_{\text{MAX}}$ , °	Мах вносимые потери $\alpha_{\text{MAX}}$ , дБ	Показатель качества* $(\varphi_{\text{MAX}} / \alpha_{\text{MAX}})$ , %/дБ	Неравномерность амплитуды коэффициента передачи $(\alpha_{\text{MAX}} - \alpha_{\text{MIN}})$ , дБ
Исходный	185,32	2,16	85,8	1,01
Альтернативный	133,9	1,34	99,9	0,37

\*Показатель качества фазовращателя определяется как отношение максимального фазового набега  $\varphi_{\text{MAX}}$  к максимальным вносимым потерям  $\alpha_{\text{MAX}}$ .

#### 4. Заключение

Предлагаемая модель фазовращателя в Ka-диапазоне обладает меньшими вносимыми потерями и более высоким показателем качества по сравнению с моделью исходного фазовращателя на 0,82 дБ и 14,1 %дБ соответственно. Также достоинством данного фазовращателя является меньшая неравномерность амплитуды коэффициента передачи 0,37 дБ против 1,01 дБ, полученная на основании семи дискретных точек значений емкости варакторов в диапазоне от 0,02 до 0,15 пФ. Предлагаемый аналоговый фазовращатель может быть использован в качестве ячейки фазовращателя в составе элемента ФАР ММДВ благодаря малым вносимым потерям и высокой компактности.

#### Список литературы

1. А.И. Задорожный, О.Г. Вендик, М.Д. Парнес, С.К. Тихонов. Высокоточный аналоговый фазовращатель для полуактивной ФАР.
2. V-band monolithic phase shifters / С.К. Pao, J.C. Chen, G.L. Lan, D.C. Wang, W.S. Wong, M.I. Herman/ Hughes Aircraft Company, Microwave Products Division Torrance, California 90509-2940, 1988, IEEE.
3. Хелзайн Дж. Пассивные и активные цепи СВЧ: Пер. с англ. под ред. А.С. Галина. – М.: Радио и связь, 1981. – 200 с.
4. A Low-Loss Ku-Band Monolithic Analog Phase Shifter / Chang-Lee Chen, William E. Courtney, Leonard J. Mahoney, IEEE transactions on microwave theory and techniques, vol. MTT-35, No. 3, March 1987.
5. Khaled Khoder, Marc Le Roy, Andre Perennec. An all-pass topology to design a 0-360 continuous phase shifter with low insertion loss and constant differential phase shift // 44<sup>th</sup> European Microwave Conference, European Microwave Week, Oct 2014, Rome, Italy. pp.1-4, 2014.
6. Курушин А.А. Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE. – М., «One-Book», 2014, 433 стр.