

УДК 621.317.39

**С.Р. Зиборов, канд. техн. наук, И.Б. Широков, канд. техн. наук,
Д.В. Синицын**

Севастопольский национальный технический университет
Студгородок, Стрелецкая балка, Севастополь, Украина, 99053
E-mail: rt.sevgtu@stel.sebastopol.ua

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ УПРАВЛЯЕМЫЙ СВЧ ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ

Проанализированы недостатки проходных фазовращателей на $p-i-n$ диодах с дискретным управлением фазовым сдвигом. Предложен фазовращатель с непрерывным управлением фазовым сдвигом с помощью настроечных диодов и цифровой коррекцией характеристики управления, а также частотной характеристики фазовращателя. Указаны области применения предложенного фазовращателя.

В настоящее время широкое применение в фазированных антенных решетках, приемопередающих устройствах и контрольно-измерительной аппаратуре СВЧ диапазона находят управляемые фазовращатели как с дискретной, так и с непрерывной характеристиками управления.

В СВЧ фазовращателях с дискретной характеристикой управления, далее называемых дискретными фазовращателями, изменение фазового сдвига осуществляют путем коммутации фазосдвигающих секций с помощью $p-i-n$ диодов [1,2]. Использование $p-i-n$ диодов в фазовращателях обусловлено их малыми массогабаритными показателями и технологичностью изготовления. Однако фазовращатели на $p-i-n$ диодах имеют ряд недостатков: дискретность характеристики управления; небольшую точность установки фазы и низкое быстродействие.

В СВЧ фазовращателях с непрерывной характеристикой управления (непрерывных фазовращателях) фазовый сдвиг регулируют с помощью варикапов, изменяя приложенное к ним напряжение смещения, запирающее $p-n$ переход варикапа. Поскольку варикапы имеют нелинейную вольт-фарадную характеристику, а фазовый сдвиг фазовращателя связан с величиной емкости варикапов также нелинейной зависимостью, то это усложняет настройку непрерывных фазовращателей. Достоинством непрерывных фазовращателей является их высокое быстродействие.

В данной работе предложен управляемый фазовращатель (рисунок 1), который позволяет объединить в себе достоинства указанных выше типов фазовращателей. Фазовращатель построен

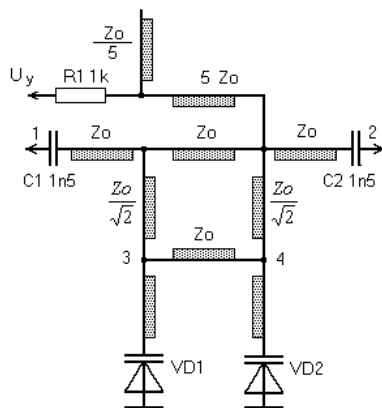


Рисунок 1 – Управляемый фазовращатель

на базе трехдецибельного направленного ответвителя, у которого плечи 1 и 2 используют как вход и выход фазовращателя, а к плечам 3 и 4 присоединены идентичные отражающие ячейки. Каждая отражающая ячейка представляет собой отрезок линии передачи, нагруженный варикапом. Поскольку сопротивление закрытого варикапа имеет реактивный (емкостной) характер, то варикапы, как сопротивления нагрузки, имеют достаточно большой коэффициент отражения.

Сигнал, поданный на вход фазовращателя (плечо 1), делится направленным ответвителем на два равных по амплитуде квадратурных сигнала, сдвинутых по фазе на 90° , которые поступают через плечи 3 и 4 на отражающие ячейки. Фазы сигналов, отраженных от варикапов, определяются их емкостным сопротивлением, которое зависит от управляющего напряжения U_y . В таком режиме работы варикапы используют в качестве управляющих элементов фазовращателя.

В качестве источника управляющего напряжения непрерывного фазовращателя предложено использовать цифровой синтезатор сигнала [3], что позволяет формировать управляющее напряжение, используя экспериментально измеренную зависимость фазового сдвига от напряжения смещения на варикапах.

Длину линий передачи отражающих ячеек целесообразно выбирать минимально возможной или кратной половине длине волны $\lambda/2$, поскольку в этом случае линия передачи не трансформирует сопротивление варикапа, приведенное к плечам 3 и 4. Сигналы, отраженные от варикапов, складываются в направленном ответвителе и поступают на выход фазовращателя (плечо 2).

Рассмотренное схемотехническое решение фазовращателя (рисунок 1) позволяет плавно изменять фазу СВЧ сигнала в широких пределах в зависимости от величины управляющего напряжения. Из-за отсутствия блокировочных конденсаторов в схеме подачи управляющего напряжения постоянная времени такой цепи достаточно мала, что ведет к уменьшению инерционности всего тракта управления фазой и является особенно важным параметром при проектировании быстродействующих радиотехнических систем.

Вместо направленного ответвителя в управляемом фазовращателе (рисунок 1) можно использовать ферритовый Y-циркулятор, в одно из плеч которого включен варикап. Использование одного варикапа вместо двух исключает проблемы, связанные с их неидентичностью. Кроме того, упрощается схема фазовращателя и возрастает точность управления фазой. Однако стоимость покупного ферритового Y-циркулятора превышает стоимость направленного ответвителя.

Комплексный коэффициент отражения варикапа, включенного на выходе линии передачи отражающей ячейки фазовращателя, имеет вид

$$\dot{\Gamma} = \frac{Z_H - Z_0}{Z_H + Z_0} = \frac{1 + jZ_0 2\pi f C_B}{1 - jZ_0 2\pi f C_B} = e^{j2 \arctg(Z_0 2\pi f C_B)}, \quad (1)$$

где Z_0 – волновое сопротивление линии передачи; $Z_H = 1 / -j2\pi f C_B$ – емкостное сопротивление варикапа; f – частота сигнала; C_B – емкость варикапа.

Из выражения (1) следует, что модуль коэффициента отражения равен единице, что свидетельствует о равенстве амплитуд падающего и отраженного сигналов, а фаза коэффициента отражения зависит от величины емкости варикапа.

На основании соотношения (1) были рассчитаны зависимости (рисунк 2) фазы коэффициента отражения от емкости варикапа на частотах 1 ГГц, 2 ГГц, 3 ГГц, 5 ГГц, 7 ГГц, 10 ГГц и 12 ГГц при $Z_0 = 50$ Ом.

Из рисунка 2 видно, что крутизна начальных участков найденных зависимостей увеличивается с ростом частоты, но при этом возрастает нелинейность зависимостей. Таким образом, данный фазовращатель позволяет получить высокую крутизну характеристики управления, т.е. высокую чувствительность фазового сдвига к управляемому напряжению, но при этом необходимо учитывать увеличение нелинейности характеристики управления фазовращателем.

На частотах выше 10 ГГц при изменении емкости диода от 0,3 до 0,4 пФ можно получить изменение фазы коэффициента отражения в диапазоне от 0 до 90°. На частотах ниже 5 ГГц для получения такого же изменения фазы коэффициента отражения необходимо изменять емкость диода в более широком диапазоне.

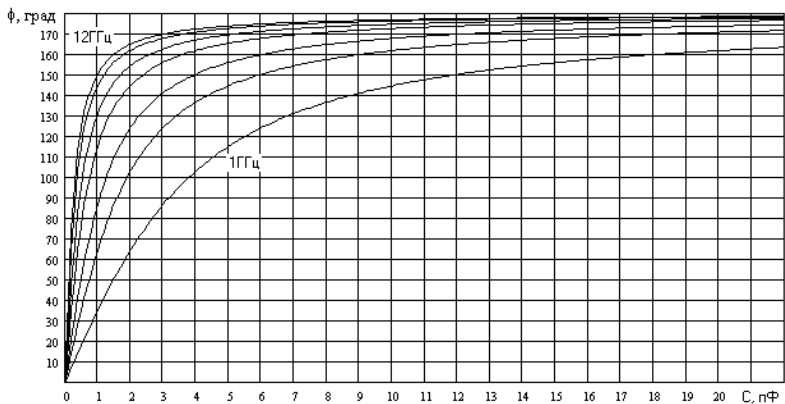


Рисунок 2 – Зависимость фазы коэффициента отражения от емкости перехода настроечного диода на частотах 1 ГГц, 2 ГГц, 3 ГГц, 5 ГГц, 7 ГГц, 10 ГГц и 12 ГГц

Если одна секция фазовращателя вносит фазовый сдвиг φ , то, соединяя последовательно n секций, можно получить фазовый сдвиг $n\varphi$. Поэтому для получения больших фазовых сдвигов необходимо использовать последовательное соединение фазосдвигающих секций.

Нелинейность управляющей характеристики фазовращателя можно существенно уменьшить с помощью соответствующей цифроаналоговой коррекции управляющего напряжения, используя ее как поправку в процессе работы фазовращателя.

На рисунке 3 показана функциональная схема широкополосного фазовращателя с коррекцией нелинейности характеристики управления.

В постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) записаны в цифровом виде наборы значений управляющего напряжения, обеспечивающие при их последовательном считывании заданный закон изменения фазового сдвига от времени на различных частотах.

На входы младших разрядов адресной шины ПЗУ, обозначенных на рисунке 3 как “Установка фазы”, подают восьмиразрядный код, который позволяет выбирать $2^8 = 256$ значений управляющего напряжения, а значит и 256 дискретных значений фазового сдвига. Например, при линейно-ступенчатом изменении фазового сдвига в диапазоне от 0 до 360° шаг изменения фазы равен $\Delta\varphi = 360/256 = 1,41^\circ$.

Каждый из кодов, поступающих на выход ПЗУ, преобразуется цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) и нормирующим усилителем (НУ) в напряжение, управляющее фазовым сдвигом, вносимым фазовращателем Φ .

На входы старших разрядов адресной шины ПЗУ, обозначенных на рисунке 3 как “Частотная коррекция”, подают четырехразрядный код, соответствующий одному из $2^4 = 16$ рабочих частотных диапазонов фазовращателя. При этом из ПЗУ считывают набор значений управляющего напряжения, соответствующий выбранному частотному диапазону. В случае необходимости число разрядов адресной шины может быть увеличено или уменьшено до требуемого значения.

Описанное выше схемотехническое решение позволяет значительно расширить рабочую полосу частот фазовращателя при достаточно малой погрешности установки фазового сдвига.

Так как в ПЗУ помещены значения калибровочных характеристик управления фазовращателя, полученные экспериментально, то на его выхо-

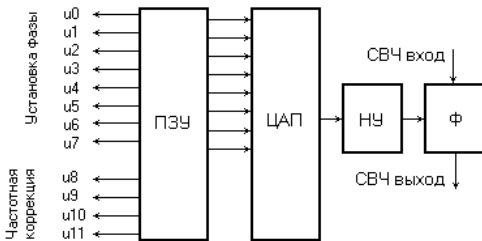


Рисунок 3 – Фазовращатель с коррекцией частотной зависимости характеристики управления

де формируется набор кодов, обеспечивающий необходимую характеристику

С целью экспериментальной проверки был разработан и изготовлен двухкаскадный фазовращатель с использова-

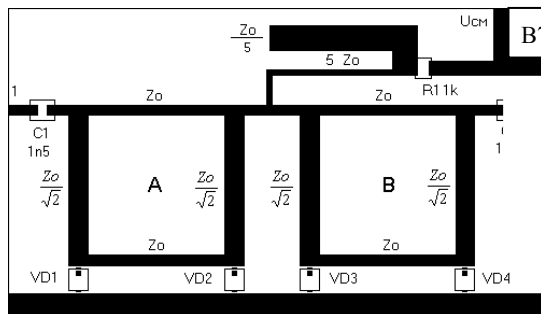


Рисунок 4 – Топология печатной платы двухсекционного фазовращателя

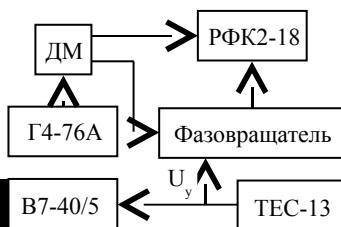


Рисунок 5 – Установка для измерения характеристики управления фазовращателя

Топология печатной платы фазовращателя изображена на рисунке 4. Фазовращатель выполнен на фольгированном органическом диэлектрике ПКТ толщиной 2мм с относительной диэлектри-

ческой проницаемостью $\epsilon = 10$. Фазовращатель состоит из двух идентичных в качестве отражательных элементов применены высокочастотные варикапы VD1-VD4 типа KB109B, емкость которых изменяется в пределах от 22 до 2 пФ, при изменении управляющего напряжения, запирающего варикап, в диапазоне от 0 до 25 В [2].

Управляющее напряжение подают через развязывающий фильтр, образованный сопротивлением $R_1 = 1$ кОм, микрополосковой четвертьволновой линией с волновым сопротивлением $5Z_0$ и микрополосковой четвертьволновой линией, разомкнутой на конце, с волновым сопротивлением $Z_0/5$. Волновое сопротивление основной линии передачи равно $Z_0 = 50$ Ом.

Схема установки для измерения характеристики управления разработанного фазовращателя изображена на рисунке 5.

С выхода генератора Г4-76А сигнал с частотой 1 ГГц поступает на делитель мощности ДМ. С одного выхода делителя мощности сигнал подается непосредственно на опорный вход фазометра РФК2-18, а с другого выхода – через исследуемый фазовращатель на измерительный вход того же фазометра. Значение управляющего напряжения U_y фазовращателя, подаваемого с блока питания ТЕС-13, контролировалось с помощью цифрового вольтметра В7-40/5. При минимальном управляющем напряжении показание фазометра РФК2-18 устанавливалось равным нулю. Затем, увеличивая обратное напряжения на варикапах, измерялось значение фазового сдвига, вносимого фазовращателем.

Экспериментально полученные характеристики управления фазовра-

щателя изображены на рисунке 6. Кривая А представляет собой характеристику управления фазосдвигающей секции А, кривая В – характеристику управления фазосдвигающей секции В, а кривая А+В – характеристику управления последовательно включенных фазосдвигающих секций А и В при их одновременной работе. Расхождение кривых А и В, по всей видимости, является следствием неидентичности вольт-фарадных характеристик применяемых варикапов. Совпадение характеристик управления в области малых управляющих напряжений объясняется тем, что в начале измерения каждой из характеристик устанавливался нулевой фазовый сдвиг между входными сигналами фазометра.

Из экспериментально измеренных характеристик управления (рисунок 6) видно, что одна фазосдвигающая секция обеспечивает фазовый сдвиг от 0 до $90...100^\circ$, при средней крутизне характеристики управления 3,5 град/вольт. Из этого следует, что при последовательном соединении четырех фазосдвигающих секций, можно получить плавное изменение фазового сдвига в диапазоне от 0 до 360° , при средней крутизне характеристики управления порядка 14 град/вольт.

Применение в СВЧ технике фазовращателей, принцип действия которых основан на отражении волны в линии, нагруженной на переменное емкостное сопротивление, позволяет следующее:

- непрерывно или дискретно изменять фазу СВЧ сигнала в больших пределах при небольшом количестве последовательно соединенных фазосдвигающих секций;
- получить высокую крутизну характеристики управления, а значит, высокую чувствительность фазового сдвига к управляющему напряжению;
- осуществлять точную установки разности фаз;
- обеспечивать быстродействующее электронное управления фазовым сдвигом;
- изменять зависимость фазового сдвига во времени программным путем, при сопряжении фазовращателя с микропроцессором или ЭВМ;

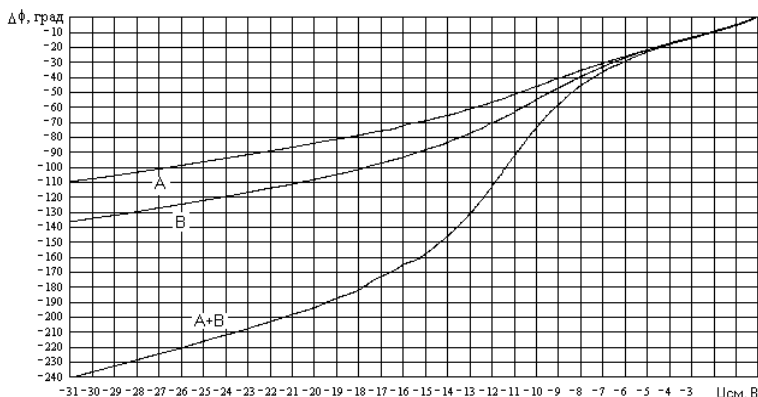


Рисунок 6 – Экспериментальная зависимость относительного фазового сдвига от напряжения смещения при работе каскадов фазовращателя

- обеспечить частотную коррекцию зависимости фазового сдвига от управляющего напряжения;
- упростить расчет и изготовление фазовращателя;
- выполнить фазовращатель на основе недорогих материалов и элементов.

Фазовращатели данного типа могут найти применение в фазированных антенных решетках с электронным сканированием луча диаграммы направленности, в автоматической радиоизмерительной, радиопередающей и радиоприемной аппаратуре, а также в системах контроля параметров технологических процессов с использованием микроволновой техники.

Дальнейшим направлением исследования управляемого фазовращателя является расширение его частотного и динамического диапазонов работы.

Библиографический список

1. Автоматические устройства СВЧ: Справочник / В.Т. Царенко, В.В. Имшенецкий, М.Ш. Борисов. — К.: Техника, 1983. — 152 с.
2. Веселов Г.И. Микроволновые устройства СВЧ / Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров. — Л.: Высш. шк., 1988. — 376 с.
3. Гнатек Ю.Р. Справочник по цифроаналоговым и аналогоцифровым преобразователям: Пер. с англ. / Ю.Р. Гнатек; Под ред. Ю.А. Рюжина. — М.: Радио и связь, 1982. — 552 с.
4. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: Справочник / А.В. Баюков, А.Б. Гитцевич, А. А.Зайцев; Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. — 2-е изд., перераб. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 744 с.

Поступила в редакцию 2.02.2004 г.