

## СИНТЕЗ КВАДРАТУРНОГО РЕГУЛЯТОРА КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ СВЧ ДИАПАЗОНА

И.Ю.КРАВЦОВ, В.М.КИЧАК, Ю.И.КРАВЦОВ

Данная работа направлена на исследование возможности построения биполярного аттенюатора для создания квадратурного регулятора комплексных коэффициентов передачи СВЧ диапазона. Исследование заключается в построении и анализе соответствующей качественной модели, которая позволяет создать модель биполярного аттенюатора, что даст возможность оценить возможные схемы построения квадратурного регулятора комплексных коэффициентов передачи СВЧ диапазона.

**Ключевые слова:** биполярный аттенюатор, коэффициент передачи, делитель мощности СВЧ, квадратурный регулятор.

### ВВЕДЕНИЕ

Квадратурный регулятор комплексных коэффициентов передач в СВЧ диапазона занимает важное место в построении систем обработки сигналов в адаптивных антенных решетках на несущей частоте. Использование биполярного аттенюатора СВЧ диапазона позволит уменьшить число управляемых элементов, мощность управляющего сигнала, габариты системы, повысить надежность, уменьшить количество и упростит форму управляющего сигнала квадратурным регулятором комплексных коэффициентов передачи СВЧ диапазона.

Классическая схема квадратурного регулятора комплексного коэффициента передачи СВЧ диапазона описана в [1].

К основным недостаткам данной схемы следует отнести большое число управляемых элементов (до 20 элементов на один канал), обусловленное малым вносимым затуханием, приходящимся на один элемент, а также значительную мощность управляющего сигнала, обусловленную большим числом управляемых элементов, синхронизацию управления аттенюатором и фазовым манипулятором. Большое число управляемых элементов также увеличивает габаритные размеры блока.

Целью настоящей работы является исследование возможности построения биполярного аттенюатора, основанного на взаимном вычитании сигналов, для создания квадратурного регулятора комплексных коэффициентов передачи СВЧ диапазона.

### 1. МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО АТТЕНЮАТОРА

Как предпосылку для создания биполярного аттенюатора рассмотрим принцип построения развязанных делителей мощности, упрощенная схема которого показана на рис. 1.

Развязка между плечами 1 и 2 достигается следующим образом. Сигнал, возбуждаемый в плече 1, поступает в плечо 2 по двум путям через сосредоточенное сопротивление  $R_2$  и отрезок линии, равный  $\lambda/2$  (предполагается, что все входы идеально согласованы). Таким образом, в плечо 2

приходят два сигнала в противофазе. При соответствующем выборе  $R_2$  можно добиться их полной компенсации. Не углубляясь в анализ, подробно приведенный в [2, 3], запишем условия идеального согласования и идеальной развязки.

$$\rho_1 = \rho_0 \sqrt{2}, \quad (1)$$

$$R_2 = 2\rho_0, \quad (2)$$

где:  $\rho_0$  — волновое сопротивление подводящих линий;  $\rho_1$  — волновое сопротивление четвертьволновых отрезков линий;  $R_2$  — развязывающее сопротивление.

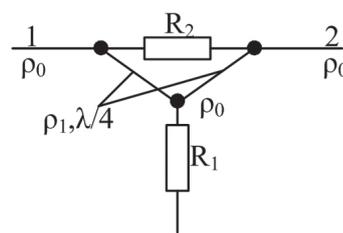


Рис. 1. Упрощенная схема биполярного аттенюатора

В зависимости от соотношения сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  могут быть осуществлены как полная передача сигнала из плеча 1 в плечо 2, так и развязка между ними.

Проанализируем зависимости модуля коэффициента передачи обоих плеч схемы от значения этих сопротивлений.

Модуль коэффициента передачи, последовательно включенного в передающую линию сопротивления:

$$|S_{12}| = \frac{2}{\sqrt{4+r^2}}, \quad (3)$$

где  $r = R/Z_0$ ;  $Z_0$  — характеристическое сопротивление линии.

Модуль коэффициента передачи, параллельно включенного в передающую линию сопротивления:

$$|S_{12}| = \frac{2}{\sqrt{4+g^2}}, \quad (4)$$

где:  $g = G/y_0$ ;  $G = 1/R$  — проводимость;  $y_0 = 1/Z$  — характеристическая проводимость линии.

Зависимость модуля коэффициента передачи плеч от изменения сопротивления  $R_1$  (кривая  $S_{122}$ ),  $R_2$  (кривая  $S_{121}$ ) соответственно и при их одновременном изменении (кривая  $S_1$ ) показаны на рис. 2.

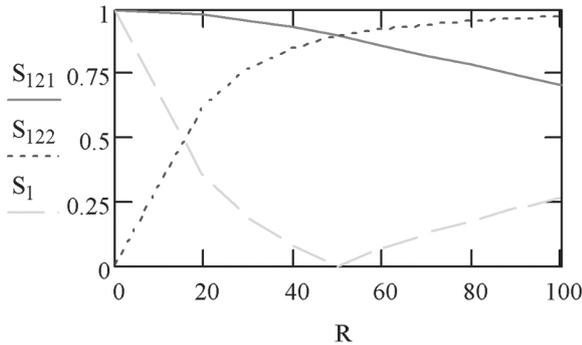


Рис. 2. Зависимость модуля коэффициента передачи плеч от изменения сопротивления  $R_1, R_2$

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что при одновременном изменении сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ , модуль коэффициента передачи может изменяться в широких пределах [4]. Рассмотрим поведение фазы выходного сигнала в схеме (рис. 2) относительно фазы входного сигнала при изменении сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ .

При малых сопротивлениях практически весь входной сигнал проходит через плечо резистора  $R_1$ , фаза выходного сигнала будет совпадать с фазой входного сигнала. При увеличении сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  в момент, когда модули коэффициента передачи обоих плеч будут равны, то выходной сигнал будет равен нулю, а фаза изменит свою полярность на  $180^\circ$ . При дальнейшем увеличении сопротивлений резисторов  $R_1$  и  $R_2$  входной сигнал проходит в основном через резистор  $R_2$ , а фаза остается неизменной. Таким образом, при одновременном увеличении сопротивлений до порогового значения фаза выходного сигнала остается постоянной и совпадает с фазой входного сигнала, после чего скачком изменяется на  $180^\circ$  относительно фазы входного сигнала и при дальнейшем увеличении сопротивлений остается постоянной. Таким образом, появляется возможность плавного управления амплитудой выходного сигнала при противоположных значениях полярности фазы, т.е. биполярного управления амплитудой.

## 2. РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА ДЛЯ БИПОЛЯРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АМПЛИТУДОЙ

Для реализации биполярного аттенюатора была использована схема СВЧ фазового манипулятора  $0^\circ$ - $180^\circ$  на диодах [5].

Экспериментальная характеристика изменения амплитуды и фазы выходного сигнала от управляющего напряжения и соответствующего ему тока диодов при значении  $R_1 = 120$  Ом показана на рис. 3.

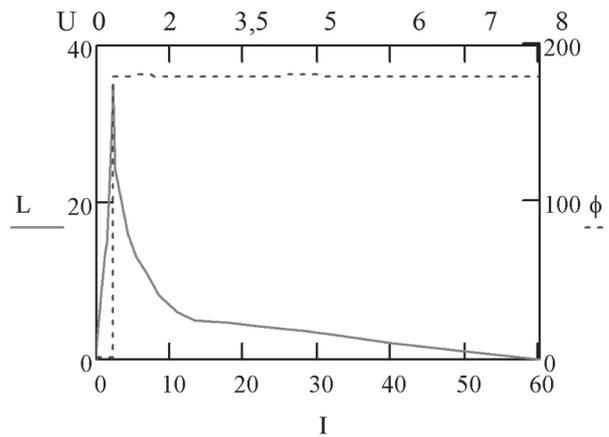


Рис. 3. Экспериментальная характеристика изменения амплитуды и фазы выходного сигнала от управляющего напряжения и соответствующего ему тока диодов

Как следует из рис. 3, левая часть характеристики затухания, соответствующая малым управляющим токам, имеет достаточно большую крутизну, в то время как ее правая часть растянута. Большое затухание (40...60 дБ) вносится в очень узком диапазоне токов управления, что создает нелинейность характеристик управления системы.

Большая крутизна левой части характеристики объясняется крутизной нелинейной зависимости сопротивления диода (соответствующая вносимому затуханию) от напряжения и соответственно тока управления. Эта зависимость может быть описана эмпирической формулой, Ом:

$$R = \frac{M}{I_{упр}^{0,87}}, \quad (5)$$

где  $M$  – параметр, зависящий от типа диода.

Для исследуемого диода  $M = 1,5$ . В диапазоне частот  $\frac{W}{W_0} \leq 0,4$  активное сопротивление p-i-n диода можно принять равным дифференциальному.

Для реализации симметричного управления биполярным аттенюатором по напряжению необходимо регулировать ток диода.

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ СИММЕТРИЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ, ПО НАПРЯЖЕНИЮ, БИПОЛЯРНЫМ АТТЕНЮАТОРОМ

Для получения симметричной характеристики вносимого затухания от напряжения управления необходимо устройство управления, позволяющее получить линейную зависимость между управляющим напряжением и дифференциальным сопротивлением диода. Из условия симметрии характеристики вносимого затухания

$$U_{max} = 2U_I, \quad (6)$$

где  $U_I$  – напряжение, при котором перебрасывается фаза входного сигнала.

Линейная зависимость между током управления и дифференциальным сопротивлением диода, которую необходимо получить, исходя из поставленных условий, описывается так:

$$R = K(I_{\max} - I_{\text{упр}}), \quad (7)$$

где  $K$  – определяется значением дифференциального сопротивления диода в выключенном состоянии, при  $I_{\text{упр}} = 0$ ,  $K = \frac{R}{I_{\max}}$ . Задачей построения является нахождение такой функции, для которой выполняется условие:

$$x = \left[ \frac{M}{I_{\text{упр}}^{0,87}} \right] = K(I_{\max} - I_{\text{упр}}), \quad (8)$$

Искомая зависимость между управляющим током и дифференциальным сопротивлением диода имеет вид:

$$R = K(I_{\max} - I_{\text{упр}}) / \frac{M}{I_{\text{упр}}^{0,87}}. \quad (9)$$

Найдем соответствующую ей вольтамперную характеристику, для чего проинтегрируем это выражение по  $I_{\text{упр}}$ :

$$U = \int \frac{K(I_{\max} - I_{\text{упр}})}{\frac{M}{I_{\text{упр}}^{0,87}}} dI_{\text{упр}} = \frac{KI_{\max} I_{\text{упр}}^{0,87}}{M \cdot 1,87} - \frac{KI_{\text{упр}}^{2,87}}{2,87}. \quad (10)$$

Вольтамперная характеристика управления без управляющего устройства (кривая  $I_1$ ) и требуемая вольтамперная характеристика для симметричной зависимости вносимого затухания от напряжения управления приведена на рис. 4 (кривая  $I_2$ ).

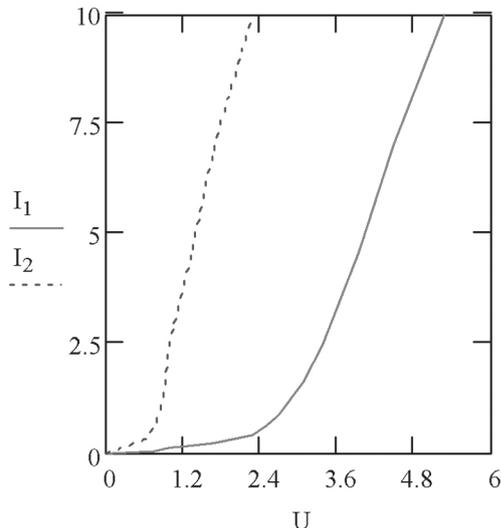


Рис. 4. Вольтамперная характеристика управления

#### 4. РЕАЛИЗАЦИЯ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Вольтамперная характеристика симметричного управления, биполярным аттенуатором, по напряжению, может быть реализована схемой с параллельным включением регулятора тока и порогового устройства. Используя в качестве порогового устройства полупроводниковый

стабилитрон, а в качестве регулятора тока полевой транзистор, получим схему стабилизирующего устройства.

Биполярный аттенуатор с устройством управления и стабилизации показан на рис. 5.

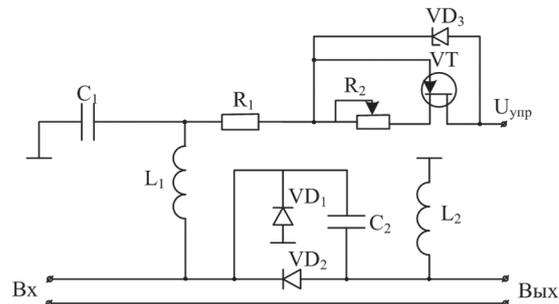


Рис. 5. Биполярный аттенуатор с устройством управления

Данная схема работает следующим образом. При значениях управляющего напряжения, меньших напряжения стабилизации стабилитрона, схема работает в режиме стабилизации тока. При этом значениям управляющих напряжений без устройства управления соответствуют меньшие токи управления, протекающие через диоды  $D_1$  и  $D_2$ , следовательно, максимальное значение вносимого затухания и перебор фазы будет получен при напряжении  $U_{n2} > U_{n1}$ . Левая часть характеристики, описывающей зависимость вносимого затухания от управляющего напряжения, будет более пологой. Когда управляющее напряжение достигает напряжения стабилизации стабилитрона, происходит его пробой, и ток управления диодами  $D_1$  и  $D_2$  протекает через стабилитрон. В результате возрастает крутизна правой части характеристики управления, и она становится близкой к симметричной.

Экспериментальная характеристика изменения амплитуды и фазы выходного сигнала от управляющего напряжения при значении  $R_1 = 120$  Ом со стабилизирующим устройством, схема которого собрана на элементах VD: КС-147, VT: КП-303, показана на рис. 6.

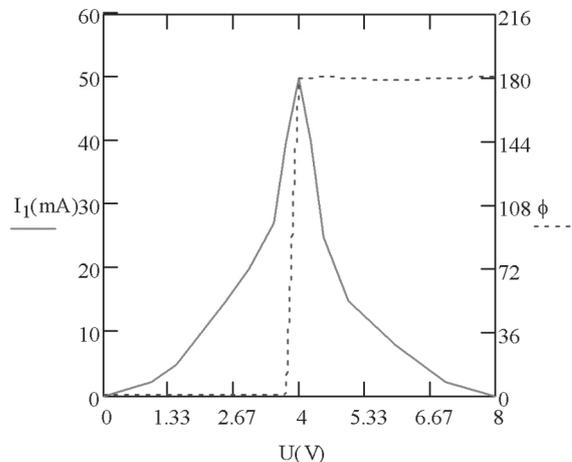


Рис. 6. Экспериментальная характеристика изменения амплитуды и фазы выходного сигнала от управляющего напряжения

Выбирая параметры стабилитрона и полевого транзистора, можно менять диапазон управления по напряжению биполярным аттенуатором.

Таким образом, введение предложенного устройства позволяет получить симметричную характеристику управления амплитудой СВЧ сигнала по напряжению с поворотом фазы на  $180^\circ$  в точке максимального затухания. Устройство с такой характеристикой может быть использовано в схеме квадратурного регулятора комплексного коэффициента передачи СВЧ диапазона.

## 5. КВАДРАТУРНЫЙ РЕГУЛЯТОР КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ

На рис. 7 показана электрическая схема разработанного квадратурного регулятора комплексного коэффициента передачи СВЧ диапазона.

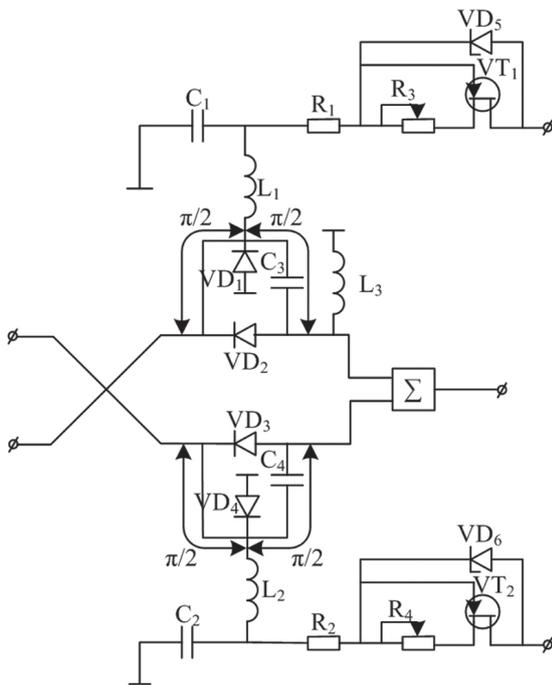


Рис. 7. Электрическая схема разработанного квадратурного регулятора комплексного коэффициента передачи СВЧ диапазона

Схема содержит 3-децибельный направленный ответвитель для создания синфазного и квадратурного канала, сумматор и биполярные аттенуаторы в каждом канале.

Работает квадратурный регулятор комплексных коэффициентов передачи СВЧ диапазона следующим образом:

Входной сигнал 3-децибельным направленным ответвителем разделяется на две составляющие, одна из составляющих сдвигается относительно другой по фазе, на  $90^\circ$ . Обе составляющие сигнала проходят через биполярные аттенуаторы. Выходной сигнал образуется суммированием составляющих сигнала на сумматоре  $\Sigma$ . При изменении амплитуд составляющих сигнала с помощью биполярного аттенуатора изменяется

амплитуда выходного сигнала и его фаза в пределах одного квадранта. При поочередном изменении полярности составляющих сигнала с помощью биполярных аттенуаторов фаза выходного сигнала переходит в другой квадрант.

СВЧ блок квадратурного регулятора комплексного коэффициента передачи показан на рис. 8.

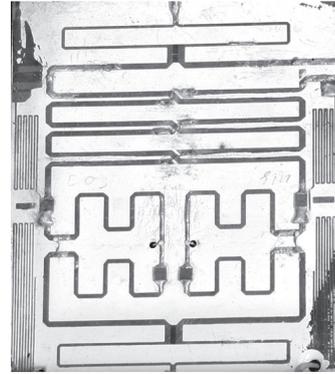


Рис. 8. СВЧ блок квадратурного регулятора комплексного коэффициента передачи

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

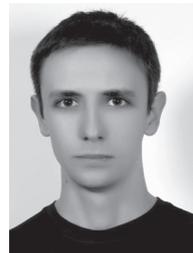
Использование биполярных аттенуаторов, выполненных по разработанной схеме, способствует значительному упрощению схемы управления квадратурным регулятором комплексного коэффициента передачи. Практически линейно изменяя два управляющих напряжения относительно пороговых значений, предложенная схема позволяет плавно управлять амплитудой в пределах до 60 дБ и фазой выходного сигнала в диапазоне  $0...360^\circ$ .

С использованием биполярных аттенуаторов в схеме достигается максимальное вносимое затуханием, при КСВ по входу и выходу не более 1,2, значительное снижение потребляемой мощности и более чем в 2 раза уменьшение габаритных размеров и массы.

## Литература.

- [1] Труды ТИАР, 1973, т.61, №6.
- [2] Малорацкий Л.Г. Микроминиатюризация элементов и устройств СВЧ. — Москва: «Советское радио», 1976. — 216 с.
- [3] Бова Н.В. Микроэлектронные устройства. — Киев: «Техніка», 1984. — 184 с.
- [4] Веселов Г.И. Микроэлектронные устройства СВЧ. — Москва: «Высшая школа», 1988. — 280 с.
- [5] Чернушенко А.М. Конструирование экранов и СВЧ-устройств. — Москва: «Радио и связь», 1990.

Поступила в редколлегию 06.06.2012



**Кравцов Иван Юрьевич**, аспирант кафедры ТКСТБ ВНТУ. Область научных интересов: обработка сигналов в телекоммуникационных системах.



**Кичак Василий Мартынович**, доктор технических наук, профессор, директор ИнРТЗП ВНТУ. Область научных интересов: цифровая обработка информации с использованием частотно-импульсного представления.



**Кравцов Юрий Иванович**, старший преподаватель кафедры ПКТА ВНТУ. Область научных интересов: пространственная обработка сигналов СВЧ. Разработка устройств СВЧ.

УДК 621.372.85

**Синтез квадратурного регулятора комплексного коэффициента передачи НВЧ диапазону** / I.Yu. Kravtsov, V.M. Kichak, Yu.I. Kravtsov // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. – Том 11. № 3. – С. 450–454.

У статті було розглянуто підхід до побудови біполярного атенюатора. На основі розробленого

біполярного атенюатора був побудований квадратурний регулятор комплексних коефіцієнтів передачі. Даний пристрій має менші габаритні розміри, менше енергоспоживання за рахунок зменшення кількості керованих елементів і просту характеристику управління.

*Ключові слова:* біполярний атенюатор, коефіцієнт передачі, подільник потужності НВЧ, квадратурний регулятор.

Л. 10. Бібліогр.: 03 найм.

UDC 621.372.85

**Synthesis of the quadrature regulator of complex microwave transmission gain** / I.Yu. Kravtsov, V.M. Kichak, Yu.I. Kravtsov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 3. – P. 450–454.

The paper presents a study of possibilities of constructing a bipolar attenuator for creating a quadrature regulator of complex microwave transmission gains. The study consists in constructing and analyzing a corresponding qualitative model that allows to create a bipolar attenuator model, which will make it possible to estimate possible diagrams of constructing a quadrature regulator of complex microwave transmission gains.

*Keywords:* bipolar attenuator, gain, microwave power divider, quadrature regulator.

Fig. 10. Ref.: 03 items.