

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УПРАВЛЯЕМОГО АТТЕНЮАТОРА С ИНВАРИАНТНЫМ К ВНОСИМОМУ ОСЛАБЛЕНИЮ ФАЗОВЫМ СДВИГОМ

О.В. Стукач

STATISTICAL MODELLING OF CHARACTERISTICS OF CONTROLLED ATTENUATOR WITH PHASE SHIFT INVARIANT WITH RESPECT TO THE INTRODUCED ATTENUATION

O.V. Stukach

Выявлены закономерности проектирования электрически управляемого аттенюатора, фазочастотная характеристика которого инвариантна к амплитудно-частотной. Показано, что при проектировании управляемых устройств с переменными состояниями необходимо выявить факторные нагрузки, раздельно влияющие на изменение фазы и вносимого затухания. Это позволяет упростить оптимизацию параметров коррекции фазы, сделав ее независимой от поиска оптимального закона регулирования элементов с управляемым сопротивлением, что приближает решение к глобально оптимальному.

Ключевые слова: статистическое моделирование, управляемый аттенюатор, коррекция фазы.

The regularities of designing of electrically controlled attenuator which phase-shift frequency characteristic is invariant with respect to amplitude-frequency one are detected. It is shown that in the design of controlled devices with variable conditions it is necessary to detect the factor loadings separately influencing upon phase shift and introduced attenuation. It enables to simplify the phase equalization parameters optimization by making it independent of search for optimal control law of elements with controllable resistance. It makes the solution more globally optimal.

Keywords: statistical modeling, controlled attenuator, phase equalization.

Учет требования неизменности фазового сдвига при регулировании коэффициента передачи или обобщенного параметра состояния необходим при проектировании модулей активных фазированных решеток, прецизионных широкополосных усилителей, аттенюаторов и других устройств с управляемым усилением или ослаблением [1]. Эта задача усложняется при работе системы в широкой полосе частот, в общем случае от нуля до нескольких гигагерц.

Изменение фазового сдвига или группового времени запаздывания обусловлено влиянием паразитных реактивностей элементов с управляемым сопротивлением. Существует определенный технологический предел в уменьшении паразитных параметров. Поэтому одной из важнейших задач является схемная минимизация фазового сдвига, возникающего при изменении коэффициента передачи, то есть компенсация паразитных реактивностей управляемых элементов схемотехническими решениями.

1. Цель работы

В статье рассматривается одна из задач СВЧ техники - проблема оптимизации параметров элементов управляемых аттенюаторов с плавным изменением ослабления [2]. Наибольшее распространение получили аттенюаторы, выполненные на основе базовой структуры Г-, Т- и П-образного соединения последовательно и параллельно включенных диодов. Сопротивление диодов под воздействием управляющего тока может меняться в широких пределах - от 2 Ом до 1 кОм, что позволяет плавно изменять затухание в тракте [3]. Инвариантность фазового сдвига в таких аттенюаторах при регулировании затухания достигается с помощью корректирующих цепей, включенных в базовую структуру. При этом один и тот же уровень вносимого ослабления может быть получен при разном соотношении сопротивлений параллельно и последовательно включенных диодов. Но изменение фазового сдвига при регулировании затухания будет различным. Следовательно, для достижения минимума фазового сдвига необходи-

Стукач Олег Владимирович - к.т.н., доцент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Томского политехнического университета; oleg@me.tusur.ru.

Stukach Oleg Vladimirovich - PhD, associate professor of computer measuring system and metrology department of Tomsk Polytechnic University; oleg@me.tusur.ru.

мо два вложенных цикла оптимизации - для управляемых элементов и корректирующих цепей.

При этом каждая итерация оптимизации параметров корректирующих цепей требует отдельной вложенной оптимизации сопротивлений управляемых элементов. Интересно отметить, что ни одна из распространенных программ схемотехнического проектирования не предусматривает оптимизацию характеристик устройств с переменными состояниями, то есть в пространстве уровней ослабления или амплитудно-частотной характеристики. Идеи работы [2] не нашли скольконибудь серьезного коммерческого использования на рынке программного обеспечения.

Целью работы является теоретическое исследование возможности упрощения автоматизированного проектирования аттенуаторов, исключая двойную оптимизацию корректирующих цепей и параметров управляемых элементов.

2. Базовое звено Г-образного фазоинвариантного аттенуатора

Схема Г-образного полувзвена аттенуатора приведена на рис. 1. Схема вносит наименьшее сопротивление в тракт, если диод $VD1$ открыт и имеет малое сопротивление, а диод $VD2$ закрыт. По мере открывания диода $VD1$ и запираания $VD2$ вносимое ослабление увеличивается.

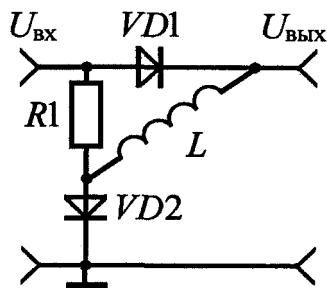


Рис. 1. Схема Г-образного звена аттенуатора

Для регулирования вносимого ослабления с минимальным изменением фазы требуется закрывать диод $VD1$ быстрее, чем открывать $VD2$. Для базовых структур электрически управляемых аттенуаторов один и тот же уровень вносимого ослабления может быть получен для различного соотношения сопротивлений управляемых элементов: либо увеличением сопротивлений диодов в последовательном плече аттенуатора, либо эквивалентным уменьшением сопротивлений диодов в параллельном плече. Но изменение фазового сдвига будет при этом неодинаковым. Поэтому важно не только правильно выбрать параметры корректирующих цепей, но и закон регулирования сопротивлений диодов. В работе [2] показано, как оптимизировать параметры управления с целью уменьшения зависимости изменения фазы от вносимого ослабления.

Фазовую стабильность обеспечивает индуктивность $L1$, которая комбинируется с паразит-

ными параметрами диодов и компенсируют изменение фазового сдвига при регулировке ослабления. Индуктивность может быть изготовлена как линия передачи. Диод $VD1$ играет роль элемента, управляющего параметром коррекции $L1$.

Г-образная структура является базовой, поскольку при ее каскадировании можно получить П- или Т-образную схему. В работе [1] показано, что наилучшими характеристиками фазовой стабильности обладает Т-образная схема.

Моделирование характеристик Т-аттенуатора проведем, используя схему замещения диода в виде параллельного соединения сопротивления диода и емкости перехода (рис. 2). Индуктивностями выводов и кристалла пренебрегаем в виду их малости.

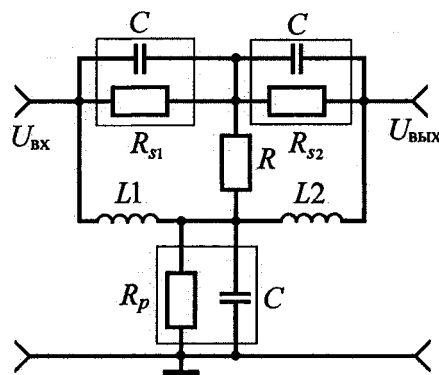


Рис. 2. Эквивалентная схема Т-образного аттенуатора

Для моделирования аттенуатора используем широко распространенный диод типа Hewlett-Packard HSMP-4810 с емкостью перехода примерно $C = 0,2$ пФ. Значение согласующего сопротивления равно $R = 50$ Ом. В результате оптимизации по критерию минимума фазового сдвига в [1] были найдены параметры коррекции: $L1=L2 = L = 0,19$ нГн и параметры управления - сопротивления диодов (приведены в таблице). Величина $R_{sjmsx} = 1000$ Ом использовалась для получения вносимого ослабления до 15 дБ.

Зависимости изменения фазового сдвига $\varphi(\omega)$ от частоты и затухания для схемы без коррекции $L1=L2 = L = 0$ (1) и с коррекцией (2) приведены на рис. 3. В диапазоне ослабления 0,2-15,5 дБ и полосе частот 0,01-3 ГГц достигнуто изменение фазового сдвига не более одного градуса. Это превышает все полученные ранее результаты [3]. В других диапазонах ослабления изменение фазового сдвига существенно меньше. В аттенуаторе без $L1, L2$ изменение фазового сдвига в той же полосе достигает 71° . Таким образом, фазовый сдвиг уменьшен за счет коррекции почти в 70 раз.

3. Регрессионная модель аттенуатора

Статистические методы являются мощным инструментом исследования систем, которые до сих пор не применялись для проектирования плав-

ных аттенюаторов. С целью установления физических закономерностей между параметрами цепи и отдельными характеристиками, а также упрощения поиска оптимальных параметров проведем статистическое моделирование.

Сопроотивления диодов аттенюатора и вносимое ослабление

Затухание	Затухание в схеме с $L1, L2$, дБ	Затухание в схеме без $L1, L2$, дБ	R_{s1} , Ом	R_p , Ом
A_0	0,2–0,5	1–1,2	5	10^3
A_1	1,9–2,0	8,5	50	10^2
A_2	3,5	14,4–13,7	10^2	50
A_3	5,2	19–17,3	150	30
A_4	15,5	29,3–23	300	5

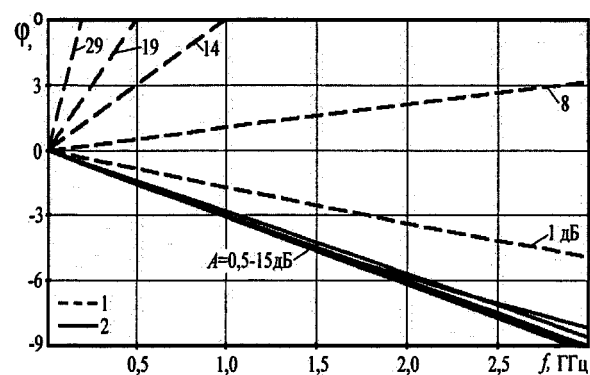


Рис. 3. Фазовый сдвиг для различных уровней ослабления:
1 – некорректированный аттенюатор;
2 – корректированный аттенюатор

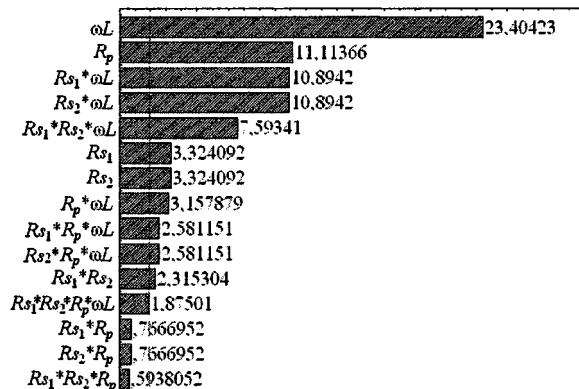
Математически регрессионная модель может быть представлена в виде:

$$A(\omega) = \alpha_0 + \sum_i \alpha X_i + \varepsilon;$$

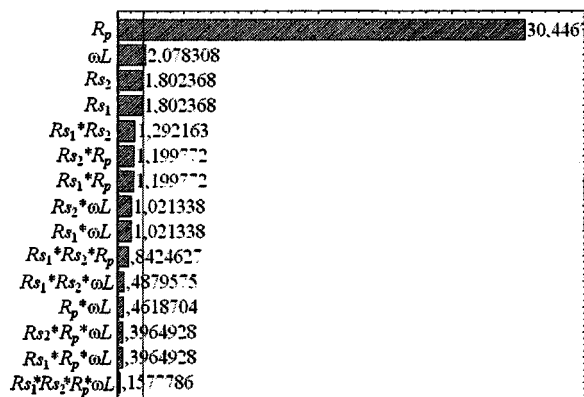
$$\Delta\varphi(\omega) = \beta_0 + \sum_i \beta X_i + \varepsilon,$$

где $\Delta\varphi(\omega)$ – изменение фазового сдвига, то есть разность между ФЧХ при начальном (A_0) и выбранном уровне ослабления (A_i), X – независимые переменные или факторы, ε – случайная составляющая, α, β – коэффициенты регрессии, подлежащие определению. Исходные данные формировались следующим образом. Для параметров коррекции $L = \{0; 0,1; 0,19; 0,4\}$ нГн и сопротивлений управления $R_{s,p} = \{5; 25; 50; 150; 250\}$ Ом на сетке частот от 1 МГц до 3 ГГц были вычислены вносимое ослабление и изменение фазового сдвига. С помощью модуля «общие регрессионные модели – факторная регрессия» в программе Statistica 6.0 для изменения фазового сдвига и вносимого затухания были построены факторные модели для набора параметров $X = \{R_{s1}, R_{s2}, R_p, \omega L\}$, а также их линейных комбинаций с емкостью диода, например, $X = \{\omega L, \omega CR_{s1}, \omega CR_p\}$. Расчеты показывают, что модель $X = \{R_{s1}, R_{s2}, R_p, \omega L\}$ имеет наимень-

шую погрешность из всех возможных вариантов. В результате моделирования найдены коэффициенты факторной регрессии, которые представлены в виде диаграмм Парето на рис. 4–5.



$p=,05$
Рис. 4. Коэффициенты факторной регрессии для изменения фазового сдвига



$p=,05$
Рис. 5. Коэффициенты факторной регрессии для вносимого затухания

Полученная модель не учитывает влияния емкостей диодов и их линейных комбинаций с остальными элементами и частотой. Усложнение модели нецелесообразно, так как это не добавит содержательной интерпретации факторов, влияющих на характеристики аттенюаторов. Тем не менее, по результатам анализа можно сделать как выводы о влиянии параметров коррекции и управления на изменение фазового сдвига и затухание, так и подтвердить физические предположения о работе схемы.

Выводы

1. Все элементы и их линейные комбинации существенно влияют на изменение фазового сдвига. Основную стабилизацию фазы обеспечивают корректирующие индуктивности $L1, L2$, параллельно включенный диод и фактор управления индуктивностями с помощью последовательно включенных диодов. Это следует из того, что коэффициенты факторной регрессии для переменных ωL (23,40423); R_p (11,11366); $R_{s1}\omega L, R_{s2}\omega L$ (10,8942) наибольшие.

2. Ослабление в тракт вносит, в основном, параллельно включенный диод (см. рис. 5, коэффициент для R_p). Влияние остальных параметров незначимо по уровню 0,05 и его можно не учитывать при формировании закона управления диодом.

3. Параллельно включенный диод сильнее всего влияет как на изменение фазы, так и на рабочее затухание, следовательно, формирование оптимального закона управления параллельным диодом принципиально необходимо для повышения точностных характеристик устройства.

4. В схеме имеется два канала передачи сигнала - через последовательно включенные диоды и корректирующие индуктивности. Влияние второго канала на затухание более существенно, чем первого.

5. Оптимизацию параметров коррекции и управления можно проводить раздельно, так как их взаимное влияние на затухание и фазочастотную характеристику вдвое меньше, чем каждого в отдельности. Данный результат делает возможной упрощение процедуры оптимизации характеристик устройств с переменными состояниями - аттенуаторов и регулируемых усилителей.

Таким образом, использование статистических методов, в частности, факторно-регрессионного анализа оправдано как для оценки физических процессов в устройстве, так и для выбора алгоритма оптимизации характеристик. Показано отсутствие необходимости во вложенной зависимой оптимизации параметров корректирующих цепей и элементов с управляемым сопротивлением.

Литература

1. Стукач, О. В. *Сигнальная и параметрическая инвариантность радиотехнических устройств: монография* / О. В. Стукач. - Томск: Изд-во ТУСУР, 2007. - 230 с.

2. Козлов, В. И. *Проектирование СВЧ устройств с помощью ЭВМ* / В. И. Козлов, Г. А. Юфит. - М: Советское радио, 1975. - 157 с.

3. Стукач, О. В. *Условие минимальной зависимости фазового сдвига от амплитудно-частотной характеристики в устройствах с переменными состояниями* / О. В. Стукач // *Известия ТПУ*. - 2005. - Т. 308, М4. - С. 157-160.

Поступила в редакцию 8 ноября 2007 г.