

УДК 621.3.09

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
КАЧЕСТВА СОГЛАСОВАНИЯ НАГРУЗКИ
НА ГРУППОВОЕ ВРЕМЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В ЛИНИИ**

А.С. Завгородний, В.Ю. Каспин

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,
kaspinyu@yandex.ru*

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос влияния качества согласования нагрузки на распространение СВЧ- и ВЧ-сигналов в линии. Представлены результаты оценки влияния нагрузки на групповое время запаздывания сигналов в линии.

Ключевые слова: S-параметры, групповое время запаздывания, длинные линии, согласование, четырехполюсник.

**INVESTIGATION OF THE INFLUENCE
OF THE QUALITY OF LOAD MATCHING
ON THE GROUP DELAY TIME IN THE LINE**

A.S. Zavgorodniy, V.Y. Kaspin

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,
kaspinyu@yandex.ru*

Abstract. This article discusses the influence of the quality of load matching on the propagation of SHF and HF signals in the line. The results of assessing the impact of the load on the group delay time of signals in the line are presented.

Keywords: S-parameters, group delay time, long lines, matching, two port.

Введение

СВЧ-устройства широко применяются во многих отраслях науки и техники, и область их применения непрерывно расширяется, обеспечивая прогресс всей радиоэлектронной аппаратуры. В измерениях часто требуется разделить полезный СВЧ-сигнал между несколькими потребителями. Это разделение осуществляется с помощью делителей и дуплексеров, которые связывают между собой три и более трактов. При этом качество согласования потребителей может быть очень разным. Устройства с метрологическими разъёмами в быту и производстве используются редко. По этой причине потребители могут влиять на условия передачи полезного сигнала в тракте, что может сказаться на режиме работы всей системы, то есть одни потребители могут негативно влиять на качество сигнала для других.

Один из параметров, на которых сказывается потребитель, является групповое время запаздывания (ГВЗ) сигналов [1]. В этой связи можно рассмотреть модель линии, которую мы будем описывать с помощью аппарата S -параметров. При этом анализ линии сводится к исследованию четырехполосника и его матрицы рассеяния при разном качестве согласования нагрузок.

Теоретическая часть

Для получения теоретических и экспериментальных результатов рассмотрим линию (рис. 1), состоящую из кабеля, делителя и нагрузки. Будем изменять нагрузку, имитируя подключение потребителя сигналов. Коэффициент отражения на входе нагрузки определяется как [2]:

$$\Gamma_{\text{вх}} = s_{11} + \Gamma_{\text{н}} \cdot \frac{s_{21} \cdot s_{12}}{1 - \Gamma_{\text{н}} \cdot s_{21}}, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{вх}}$ — коэффициент отражения от входа линии; $\Gamma_{\text{н}} = 1$ — коэффициент отражения от холостого хода («XX» на рис. 1), s_{ii} имеет физический смысл коэффициента отражения от i -го порта, s_{ij} — физический смысл коэффициента передачи с j -го порта на i -й порт.

Установим связь между параметром s_{21} получившейся системы и параметрами элементов этой системы.

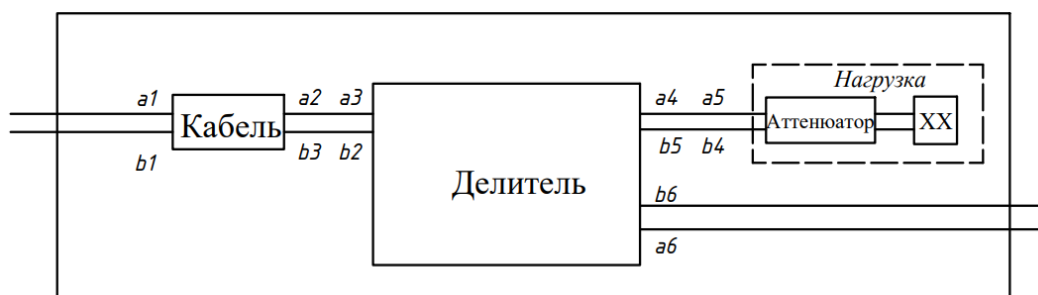


Рис. 1. Структурная схема исследуемого соединения, XX — холостой ход

Для этого необходимо по известным матрицам S -параметров отдельных элементов рассчитать общую матрицу. Это можно сделать, представив сложное соединение матриц в виде каскадного соединения отдельных СВЧ-устройств по методике [3].

Запишем параметры компонентов данной схемы в виде матрицы сложного соединения:

$$\begin{pmatrix} b1 \\ b6 \\ - \\ b2 \\ b3 \\ b4 \\ b5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s11^k & 0 & | & s12^k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s33^D & | & 0 & b6 & b6 & 0 \\ - & - & + & - & - & - & - \\ s21^k & 0 & | & s22^k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s13^D & | & 0 & s11^D & s12^D & 0 \\ 0 & s23^D & | & 0 & s21^D & s22^D & 0 \\ 0 & 0 & | & 0 & 0 & 0 & \Gamma_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a1 \\ a6 \\ - \\ a2 \\ a3 \\ a4 \\ a5 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $b1, b6$ — внешние отражённые волны; $a1, a6$ — внешние падающие волны; $b2, b3, b4, b5$ и $a2, a3, a4, a5$ — внутренние отражённые и падающие волны соответственно; s^k — коэффициенты, относящиеся к кабелю; s^D — коэффициенты, относящиеся к делителю; Γ_n — коэффициент отражения от нагрузки.

Неизвестным в этой системе является вектор переменных $\begin{pmatrix} b_1 \\ b_6 \end{pmatrix}$. Решение уравнения находится как [4]:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_6 \end{pmatrix} = S_{pp} + S_{pk}(1 - \Gamma)^{-1} S_{kp}, \quad (3)$$

где S_{pp} — матрица, характеризующая коэффициент отражения волн от внешних портов устройства; S_{kp} — матрица, характеризующая коэффициент передачи с внешних портов на внутренние; S_{pk} — матрица, характеризующая коэффициент передачи с внутренних портов на внешние, Γ — матрица соединений.

Применительно к рассматриваемому случаю:

$$S = \begin{pmatrix} s11^k & 0 \\ 0 & s33^D \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s12^k & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s31^D & s32^D & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -s22^k & 1 & 0 & 0 \\ 1 & -s11^D & -s12^D & 0 \\ 0 & -s21^D & -s21^D & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \Gamma_n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} s21^D & 0 \\ 0 & s13^D \\ 0 & s23^D \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Исходными данными для проведения расчетов по модели (4) послужили результаты измерений S -параметров элементов тракта. Это было сделано при помощи векторного анализатора цепей [5]. Также в этой модели при расчёте использовались разные нагрузки, отличающиеся значением ослабления аттенюатора. При изменении ослабления в пределах от 3 до 20 дБ коэффициент отражения в плече делителя менялся в пределах одного–двух порядков. Моделирование проводилось с использованием среды математического моделирования Matlab [6].

Качество согласования оценивалось коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН), который определяется как (5) [2]:

$$\text{КСВН} = \frac{1 + |\Gamma_{\text{ВХ}}|}{1 - |\Gamma_{\text{ВХ}}|}. \quad (5)$$

Результаты моделирования показали увеличение как размаха частотной зависимости ГВЗ в тракте, так и среднеквадратического значения. То есть ухудшение качества согласования нагрузки, согласно модели, привело к появлению неравномерности ГВЗ.

Экспериментальная часть

Для подтверждения результатов моделирования был проведён эксперимент. СВЧ-устройства были собраны по схеме, представленной на рис. 1. В ходе эксперимента в качестве нагрузки использовался ступенчатый аттенюатор с коэффициентами ослабления от 1 до 10 дБ, нагруженный на «холостой ход».

Определение коэффициентов матрицы S -параметров осуществлялось с помощью векторного анализатора цепей. Измерения проводились в диапазоне частот 1–2 ГГц. В результате были получены данные для построения экспериментальных зависимостей (см. рис. 2).

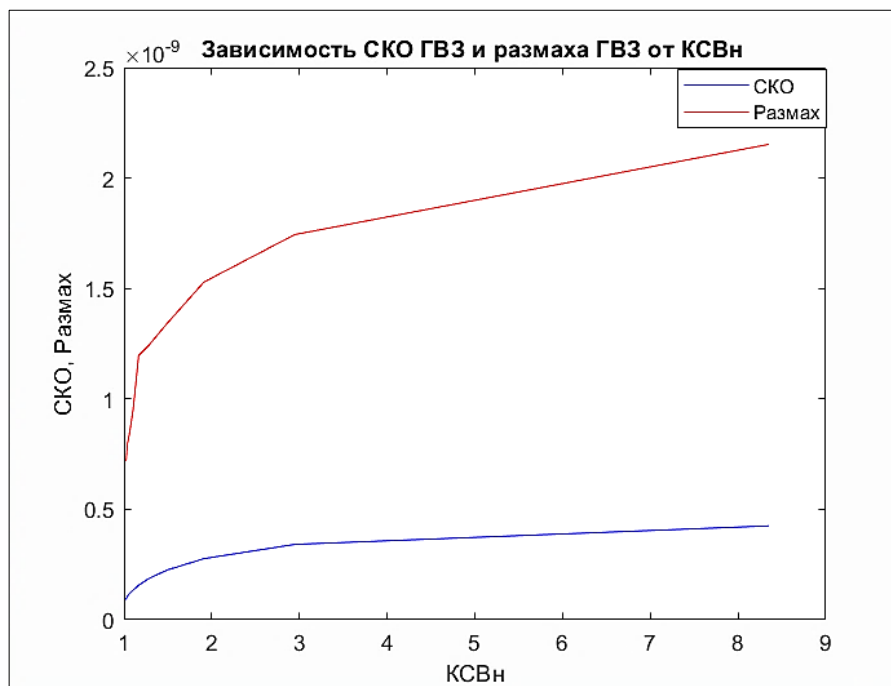


Рис. 2. Экспериментальная зависимость СКО ГВЗ и размаха ГВЗ от КСВН

По полученным зависимостям можно сказать, что с увеличением КСВН увеличивается разброс значений относительно среднего, что соответствует прогнозу математической модели.

Для подтверждения корректности методики оценки ГВЗ линии, используемой в теоретической части, были измерены S -параметры всех элементов схемы по отдельности и подставлены в математическую модель. Таким образом мы получили возможность сравнить ГВЗ собранной линии и ГВЗ, полученное подстановкой измеренных параметров в математическую модель (рис. 3). При этом ГВЗ модели отличается от ГВЗ собранной линии не более чем на 0,2 нс, что демонстрирует применимость модели.

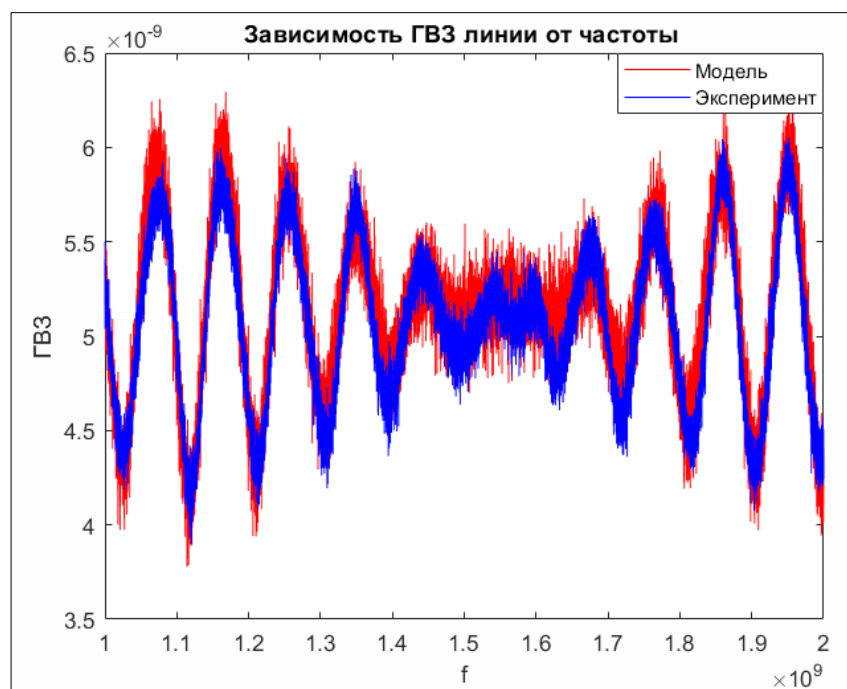


Рис. 3. Сравнение модели и результатов эксперимента при ослаблении 0 дБ, КСВН = 8,35, $\Gamma_n = 0,78$

Выводы

В результате работы была исследована математическая модель участка длинной линии, работающей на нагрузку разного качества (с точки зрения согласования). При плохом согласовании нагрузка существенно влияла на условия распространения волны, и ГВЗ становилось функцией частоты сигнала. Напротив, наилучшее согласование приближало линию к не искажающей (ГВЗ — постоянная величина). Таким образом, работа демонстрирует необходимость качественного согласования всех потребителей сигнала в тракте.

Список литературы

1. Раушер К. Основы спектрального анализа / пер. с англ. С.М. Смольского, под редакцией Ю.А. Гребенко, 2-е изд. — 2014. — 226 с.
2. Дансмор Д. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. — М.: Техносфера, 2018. — 736 с.
3. Тюрнев В.В. Теория цепей СВЧ: учеб. пособие // В.В. Тюрнев. — Красноярск: ИПЦ КГТУ (рукопись изд. 2), 2006. — 199 с.
4. Конспект лекций по высшей математике: полный курс / Д.Т. Письменный, 10-е изд., испр. — М.: Айрис-пресс, 2011. — 608 с.
5. Руководство по эксплуатации векторного анализатора цепей: [сайт]. — URL: <https://www.keysight.com/ru/ru/support/N5222A/pna-microwave-network-analyzer-265-ghz.html> (дата обращения: 18.07.2022).
6. Кетков Ю.Л. MATLAB 7: программирование, численные методы. — СПб.: БХВ — Петербург, 2005. — 752 с.

Статья поступила в редакцию: 12.09.2022 г.

Статья прошла рецензирование: 01.11.2022 г.

Статья принята в работу: 07.11.2022 г.