

УДК 621.385.69

**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОЧАСТОТНОГО  
ТРАКТА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЗВЕНЬЕВ**  
А.А. Бакулин, А.С. Завгородний

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
BA.2k01@yandex.ru, alexeysz88@mail.ru*

*Аннотация. В статье предложен метод моделирования участка тракта крупноапertureной антенной системы. Исследованы S-параметры и групповое время запаздывания системы с параллельным соединением звеньев. Описаны особенности моделирования тракта.*

*Ключевые слова: S-параметры, групповое время запаздывания (ГВЗ), ослабление, коэффициент передачи, параллельное соединение четырехполюсников.*

**CHARACTERISTICS ANALYSIS OF THE HIGH-FREQUENCY  
CHANNEL WITH PARALLEL CONNECTION OF UNITS**

**А.А. Bakulin, A.S. Zavgorodniy**

*FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleev, Moscow region, Russia,  
BA.2k01@yandex.ru, alexeysz88@mail.ru*

*Abstract. The paper proposes a method for modeling a section of a large-aperture antenna system channel. The S-parameters and group delay of the system with parallel link connection was investigated. The peculiarities of the channel modeling was described.*

*Keywords: S-parameters, group delay, attenuation, gain, parallel connection of quadripoles.*

**Введение**

Активное освоение СВЧ-диапазона началось в XX в. и продолжается по сегодняшний день. В настоящее время антенная и СВЧ-техника являются одними из важнейших направлений в радиотехнике. Современные СВЧ-устройства решают множество задач: обеспечение передачи мощности высокочастотного сигнала с минимальными потерями, фильтрация, разделение и сложение сигналов, генерация, излучение сигналов и т.д. С количеством выполняемых функций растёт и сложность устройства. Достижения в области СВЧ привели к созданию сложных, составных устройств, оценка параметров которых на основе характеристик звеньев представляет собой непростую техническую задачу. В частности, существуют системы, содержащие параллельное включенные звенья. Их характеристики представляют интерес с точки зрения распространения сигналов.

Статья посвящена анализу математической модели такого соединения и экспериментальному подтверждению выводов.

## Теоретическая часть

Представим отрезки тракта в виде многополюсников, которые характеризуют так называемыми волновыми матрицами: матрица передачи  $T$ , которая справедлива для четырехполюсников, и матрица рассеяния  $S$ , применяемая для устройств с любым чётным числом полюсов. Набор коэффициентов матрицы  $S$  ставит в соответствие отражённым волнам падающие для всех портов устройства. Диагональные элементы матрицы имеют физический смысл коэффициентов отражения от порта с соответствующим номером. Прочие элементы представляют собой коэффициенты передачи с одного порта на другой.

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{pmatrix}.$$

Для того чтобы определить коэффициенты, используют векторные методы анализа цепей. При этом сигнал подаётся только на исследуемый порт, а прибор регистрирует сигналы на выходе портов. Далее коэффициенты находятся как отношение сигнала на одном из выходов к входному сигналу. Исходя из этого, для произвольного многополюсника можно записать систему уравнений, в которой будет отражена внутренняя структура этого многополюсника. Строки, относящиеся к «внешним сигналам» (сигналы, подаваемые или снимаемые с портов, которыми устройство буде подключаться к измерительной аппаратуре или фидерному тракту), переместим наверх системы уравнений. Система примет вид [1]:

$$\begin{bmatrix} b_p \\ b_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{pp} & S_{pi} \\ S_{ip} & S_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_p \\ a_i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Здесь  $b_p$  и  $a_p$  — нормированные сигналы внешних портов;  $b_i$  и  $a_i$  — нормированные сигналы внутренних портов соответственно;  $a$  — падающая волна;  $b$  — отражённая волна;  $S_{pp}$  — матрица, характеризующая коэффициент отражения волн от внешних портов устройства;  $S_{ii}$  — матрица, характеризующая коэффициент отражения волн от внутренних портов устройства;  $S_{ip}$  — матрица, характеризующая коэффициент передачи с внешних портов на внутренние;  $S_{pi}$  — матрица, характеризующая коэффициент передачи с внутренних портов на внешние.

Ограничения накладываются внутренними соединениями. Соединения узлов отражены в матрице соединений  $\Gamma$ :

$$b_i = \Gamma a_i. \quad (2)$$

Объединяя (1) и (2), можно получить следующее:

$$\Gamma a_i = S_{ip} a_p + S_{ii} a_i. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), получаем матрицу  $S$ , характеризующую устройство в целом:

$$S_p = S_{pp} + S_{pi}(\Gamma - S_{ii})^{-1}S_{ip}. \quad (4)$$

Условие неискажающей передачи сигнала в терминах  $S$ -параметров можно сформулировать следующим образом:  $|S_{ij}| = \text{const}$ ,  $\arg(S_{ij}) = -k\omega$  [2]. Линейность фазовой характеристики означает одинаковую задержку сигналов на любой частоте. На практике задержка редко одинакова и зависит от частоты сигнала. Эту задержку принято называть групповым временем задержки или запаздывания (ГВЗ). ГВЗ определяется как [3]:

$$\tau = -\frac{d\phi(\omega)}{d\omega}.$$

Для решения задачи калибровки ГВЗ необходима разработка математического аппарата расчёта параметров узлов такого соединения по частным матрицам рассеяния. Особенno интересны случаи, когда полосы пропускания параллельных участков тракта пересекаются.

Таким образом, задача исследования модели сводится к расчёту матрицы  $S$ -устройства, определению  $\arg(S_{21})$ , нахождению ГВЗ и сравнению его с результатами прямых измерений.

### Практическая часть

Исследуемое устройство представляет собой параллельное соединение двух отрезков тракта, делителя сигналов и сумматора сигнала (см. рис. 1). В качестве элементов используются:

- Делитель — Mini-Circuits ZFRSC-183-S+;
- Фильтр диапазона L1 — Mini-Circuits VBF1575+;
- Фильтр диапазона L2 — Mini-Circuits ZX75BP-1205-S+;
- Фильтр диапазона L3 — Mini-Circuits ZX75BP-1260-S+.

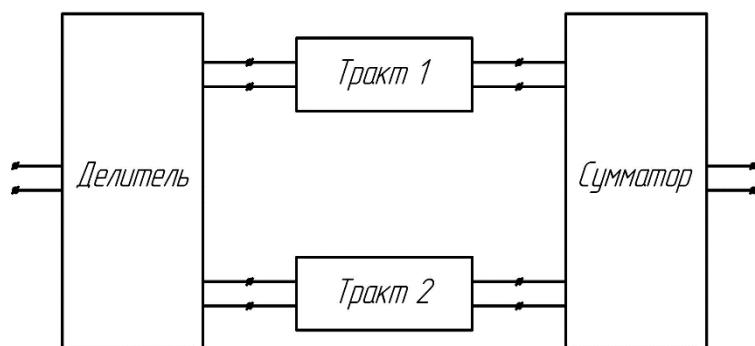


Рис. 1. Схема исследуемого тракта

В качестве параллельных участков выбирались попарно фильтры позиций (2–4).

Матрицы рассеяния элементарных звеньев (1–4) были получены путём прямых измерений при помощи векторного анализатора цепей (ВАЦ) Keysight N5222A. Данные были сохранены в виде файлов и обработаны в среде математического моделирования MatLab [4]. В результате были получены расчётные комплексные значения  $S$ -параметров рассматриваемого участка в целом в диапазоне частот от 1 до 2 ГГц. Также при помощи ВАЦ были проведены измерения  $S$ -параметров устройства в сборе (в т.ч. ГВЗ).

Очевидно, для измерений многопортовых устройств требуется многопортовая калибровка ВАЦ. Если использовать набор калибровочных мер, то, например, даже для двухпортовой SOLT-калибровки, необходимо осуществить 7 подключений. С ростом количества подключений погрешности, связанные с повторяемостью и стабильностью измерительных кабелей, возрастают. По этим причинам для калибровки ВАЦ применялся модуль электронной калибровки ECal — электронное твердотельное устройство, позволяющее осуществить калибровку двух портов анализатора за одно подключение, что позволяет существенно повысить скорость проводимой калибровки и сэкономить ресурс соединителей. Однако в процессе калибровки и последующих измерений было установлено, что модуль калибровки влияет на систематическую составляющую результатов измерений. Если проводить калибровку с использованием механических мер, оставив модуль ECal подключенным к ВАЦ, то все полученные данные отличаются на некоторую постоянную величину около 0,01 дБ. При этом характер отклонения нельзя назвать случайным, поскольку данная особенность была замечена при измерении всех узлов тракта. Этот эффект не наблюдается, если отключить модуль ECal при калибровке механическими мерами или если выполнять калибровку с применением самого модуля. Сравнение результатов моделирования и результатов измерений показано на рис. 2.

Модельное ГВЗ тракта с параллельным участком, если полосы пропускания параллельных плечей не пересекаются (т.е. не имеют общих частот), практически не отличается от ГВЗ реального устройства, измеренного ВАЦ. Разница не превосходит на 0,1 нс, что соответствует пределу погрешности измерений. Это демонстрирует справедливость модели. Однако в случае, если полосы пропускания параллельных участков перекрываются, то в области общих частот возникают выбросы как в большую, так и в меньшую сторону. Это объясняется эффектом сложения сигналов, прошедших одновременно по параллельным участкам, в фазе или в противофазе. Такие частоты определяются из соотношения:

$$f_{\text{запрещённая}} = \frac{2k + 1}{2\Delta\tau}.$$

Здесь  $\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  — разность ГВЗ в двух плечах.

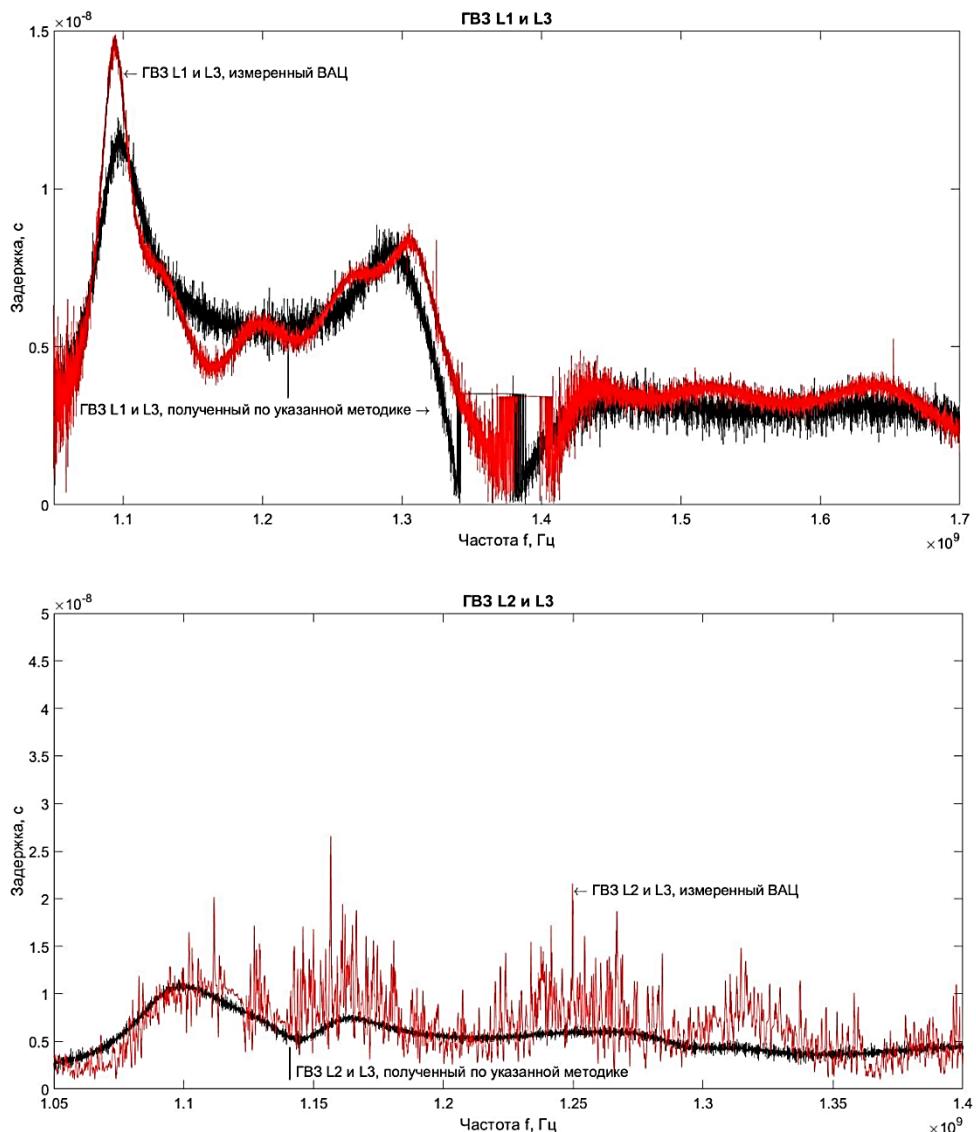


Рис. 2. Сравнение ГВЗ математической модели и результатов измерений ВАЦ для системы, состоящей из фильтров диапазонов L1–L3 (сверху) и L2–L3 (снизу)

### Выводы

Математическая модель показала свою применимость для анализа тракта с параллельным соединением участков, полосы пропускания которых не пересекаются. Если полосы пропускания параллельных участков пересекаются (имеют общие частоты), то наблюдаются эффекты, которые используемая модель не описывает, так как в этих областях возможны появления участков АЧХ со стремящимся к нулю коэффициентом передачи. Модель требует дополнения с целью учета этих эффектов, что будет задачей следующей работы.

### **Список литературы**

1. Тюрнев В.В. Теория цепей СВЧ: учеб. пособие. — Красноярск: ИПЦ КГТУ (рукопись изд. 2), 2006. — С. 70–74.
2. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: учеб. для радиотехнич. спец. вузов. — М.: Высш. шк., 1988. — 432 с.
3. Дансмор Джоэль П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей. — М.: Техносфера, 2018. — 736 с.
4. MATLAB. Полный самоучитель. — М.: ДМК Пресс, 2012. — 768 с.

*Статья поступила в редакцию: 12.09.2022 г.*

*Статья прошла рецензирование: 01.11.2022 г.*

*Статья принята в работу: 07.11.2022 г.*