

УДК 621.317.7

А.А. Савин

## Расчет коэффициента отражения верификационного стандарта Битти с помощью частотно-временной модели

Рассмотрена частотно-временная модель для расчета комплексного коэффициента отражения стандарта Битти. Приведены результаты сравнения расчетных значений с измерениями на приборе Agilent E8364B в коаксиальном тракте 7,0/3,04 мм.

**Ключевые слова:** коэффициент отражения, верификационный стандарт Битти, частотная характеристика, импульсная характеристика, векторный анализатор цепей.

**Постановка задачи.** В настоящее время существует два основных способа математического описания каналов распространения радиосигналов: с помощью частотной характеристики  $K(j\omega)$  и с помощью импульсной характеристики  $h(\tau)$ . Они связаны между собой парой преобразований Фурье. Таким образом, имея частотную характеристику, несложно получить импульсную и наоборот.

Стандарт Битти, применяемый для верификации (т.е. проверки работоспособности) векторного анализатора цепей (ВАЦ), представляет собой воздушную коаксиальную линию, внутренний (центральный) проводник которой состоит из трех цилиндрических соосных секций различного диаметра с аксиальной симметрией и поперечной плоскостью отражения (рис. 1) [1]. Крайние секции имеют волновое сопротивление 50 Ом, центральная – 25 Ом.

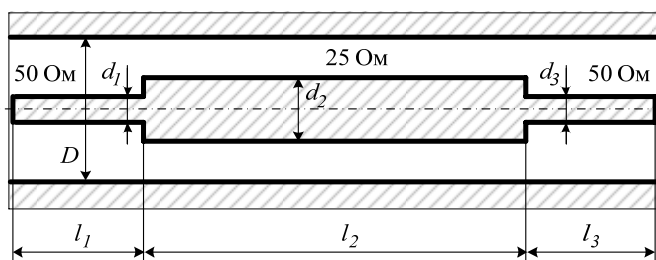


Рис. 1. Стандарт Битти и его геометрические размеры:

- $D$  – внутренний диаметр внешнего проводника;
- $d_1$  и  $d_3$  – диаметры секций 50 Ом внутреннего проводника;
- $d_2$  – диаметр секции 25 Ом внутреннего проводника;
- $l_i$  – длины секций

При расчете частотной зависимости комплексного коэффициента отражения (КО) данного стандарта необходимо учитывать два скачкообразных изменения диаметра внутреннего проводника. Наличие скачков приводит к появлению отраженной волны, параметры которой зависят не только от величины изменения характеристического импеданса линии, но и от величины ступенчатой емкости (емкости разрыва), возникающей в месте скачка. В результате отражения возникают от неоднородностей, расстояние до которых можно измерить механическими методами с высокой точностью, т.е. получить точные значения задержек отраженных сигналов  $\tau_i$ . Однако из-за наличия емкости разрыва свойства неоднородностей различны на разных частотах  $\omega$  [2]. Медленный характер зависимости свойств этих двух неоднородностей от частоты позволяет использовать различные интерполяции.

При анализе устройств, подобных рассматриваемому стандарту, принято использовать  $S$ -параметры и теорию графов [1]. Известно, что матрица  $S$ -параметров представляет собой полное частотное описание участка или всей цепи. В данной работе ставится задача получить частотно-временное представление тракта отражения радиосигналов  $s(\tau, \omega)$  для стандарта Битти как устройства с выраженной дискретной многолучевостью. На основе полученного представления выполнить высокоточный расчет частотной зависимости КО и провести сравнение результатов расчета с измерениями на ВАЦ.

**Частотно-временная эмпирическая модель стандарта Битти.** Для составления модели и проведения исследований в работе используется стандарт Битти фирмы Agilent для коаксиального тракта 7,0/3,04 мм [3]. Главным преимуществом данного изделия является отсутствие поддерживающей шайбы, что исключает появление дополнительных отраженных сигналов. В табл. 1 приведены результаты прецизионных измерений геометрических размеров стандарта, которые были по-

лучены при помощи нутромера в составе с индикатором часового типа Mitutoyo 2109S-10 с ценой деления 1 мкм, насадкой 526–150 м мерой, 7,000 мм.

Таблица 1

**Параметры линии**

Номер участка $k$	Номинальное волновое сопротивление, Ом	Длина $l_k$ , мм	Диаметр внешнего проводника $D$ , мм	Диаметр внутреннего проводника $d_k$ , мм
1	50	24,946	7,000	3,038
2	25	74,9123	7,000	4,615
3	50	25,006	7,000	3,039

Примечание. Соединитель участка № 1 – розетка.

Прежде чем приступить к составлению частотно-временной модели стандарта, рассмотрим результаты измерений комплексного КО, которые приведены на рис. 2. Измерения выполнены при помощи ВАЦ Agilent E8364В в диапазоне частот от 20 МГц до 18 ГГц с шагом 20 МГц и опорным сечением 50 Ом. Для проведения измерений выполнена высокоточная двухпортовая калибровка TRL [4]. Для решения задачи, поставленной в данной работе, достаточно рассмотреть параметр  $S_{11}$ . Коррекция систематической погрешности при выполнении двухпортовых измерений и использовании измерений только с одного порта ВАЦ фактически означает наличие идеальной согласованной нагрузки (СН) на втором порту исследуемого устройства. Это приводит к тому, что третий участок линии практически не влияет на результаты измерений КО.

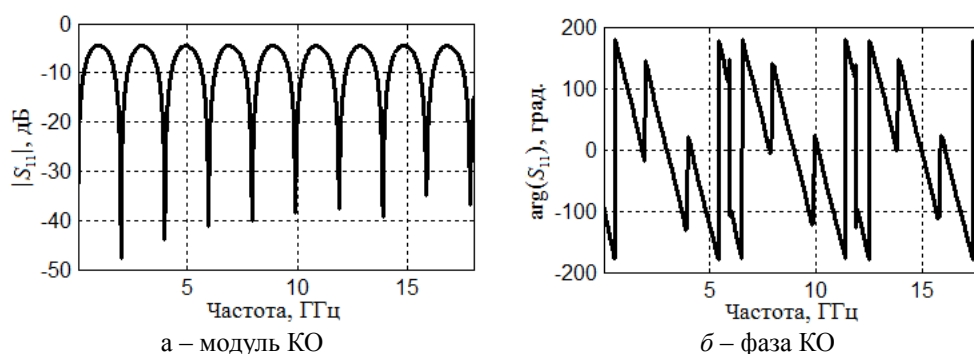


Рис. 2. Измеренные значения модуля и фазы КО (параметр  $S_{11}$ ) стандарта Битти

Выполним обратное преобразование Фурье и рассмотрим импульсную характеристику (ИХ) канала отражения стандарта Битти. Модуль ИХ показан на рис. 3. На оси абсцисс отложены расстояния до неоднородностей в одном направлении.

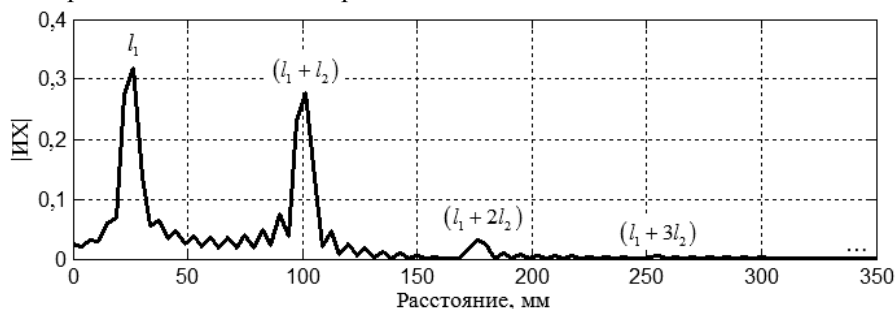


Рис. 3. Модуль импульсной характеристики в линейном масштабе на информативном участке

Как видно из приведенных графиков, из бесконечного числа существенное влияние оказывают несколько первых отражений. Расстояние до первого скачка волнового сопротивления равно  $l_1$  и обуславливает первый и максимальный пик ИХ. Затухание в подводящих линиях приводит к тому, что второй пик ИХ, находящийся на расстоянии  $(l_1 + l_2)$ , несколько меньше первого. Наличие третьего отраженного сигнала связано с двукратным отражением от второй неоднородности. Схематично на рис. 4 показаны пути распространения первых трех отраженных сигналов.

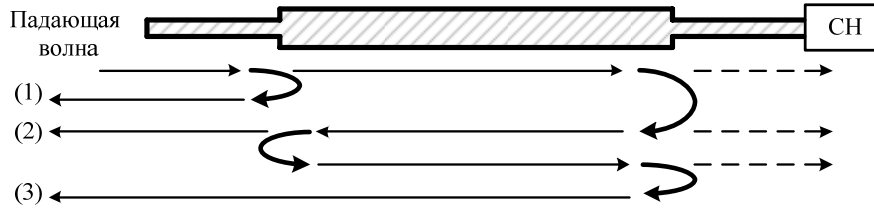


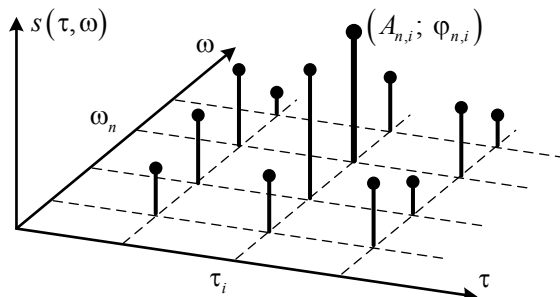
Рис. 4. Формирование отсчетов ИХ стандарта Битти

Таким образом, многолучевость обусловлена наличием многократных переотражений. Выражение для нахождения задержки  $i$ -го луча имеет следующий вид:

$$\tau_i = \frac{2l_1 + 2l_2 \cdot (i-1)}{c}, \quad i=1, 2, \dots, I, \dots, \quad (1)$$

где  $c = 299792458$  м/с – скорость света в вакууме.

Амплитуда волны, отраженной от скачка волнового сопротивления с 50 на 25 Ом или наоборот, меньше амплитуды падающей волны примерно на 9,5 дБ. Появление двукратного отражения приводит к ослаблению еще на 19 дБ. В результате шестой луч претерпевает ослабление около 85,5 дБ. В данных приближенных расчетах не учтено ослабление в подводящих линиях. Уровень собственных шумов ВАЦ в рабочем режиме (полоса фильтра промежуточной частоты 1 кГц, выключенный режим покадрового усреднения) составляет порядка –90 дБ. Таким образом, для составления прецизионной модели стандарта Битти во временной области можно ограничиться  $I = 6$ , т.е. шестью отсчетами ИХ. Для каждого отсчета необходимо определить амплитуду и фазу. Однако, ввиду наличия емкости скачка и, соответственно, частотной зависимости амплитуды и фазы отраженной волны, для каждого отсчета ИХ следует использовать  $N$  значений амплитуд и фаз для частот  $\omega_n$ , где  $n=1, 2, \dots, N$ . Схематично данное представление показано на рис. 5.

Рис. 5. Эмпирическая частотно-временная модель канала распространения радиоволн  $s(\tau, \omega)$ 

Число  $N$  зависит от спектрального состава частотной зависимости амплитуды и фазы отраженного сигнала. При медленном характере изменения указанных параметров, как в рассматриваемом примере, можно ограничиться  $N=10$ . В случае необходимости получения значений амплитуды и фазы на частотах, отличных от  $\omega_n$ , можно использовать различные способы интерполяции, например сплайнами.

Получим выражение для расчета частотной зависимости комплексного КО через параметры рассмотренной модели:

$$S_{11}^C(\omega) = \sum_{i=1}^I A_i(\omega) \cdot \exp[j\varphi_i(\omega)] \cdot \exp[-j\omega\tau_i], \quad (2)$$

где  $A_i(\omega)$  и  $\varphi_i(\omega)$  – интерполированные значения амплитуды и фазы на частоту  $\omega$ . Интерполяция производится при помощи набора из  $N$  значений  $A_{n,i}$  и  $\varphi_{n,i}$ .

**Результаты экспериментальных исследований.** На рис. 6–8 приведены величины, характеризующие отличие измеренных значений КО от расчетных значений. Анализируются разность модулей  $\Delta$ , разность фаз  $\Delta\varphi$  и модуль разности  $|\delta|$ , которые могут быть определены по формулам:

$$\Delta = \left| S_{11}^M \right| - \left| S_{11}^C \right|, \quad (3)$$

$$\Delta\varphi = \arg(S_{11}^M) - \arg(S_{11}^C), \quad (4)$$

$$|\delta| = \left| S_{11}^M - S_{11}^C \right|, \quad (5)$$

где  $S_{11}^C$  – расчетное значение КО, полученное при помощи (2) для  $I=5$  и  $N=5$  при интерполяции кубическими сплайнами;  $S_{11}^M$  – измеренное значение КО, полученное на ВАЦ Е8364В (сплошные

линии на рис. 6–8). Кроме этого, результаты расчетов сравнивались с опорными данными описания стандарта (пунктирные линии на рис. 6–8), которые приводятся на электронном носителе в верификационном комплекте [3].

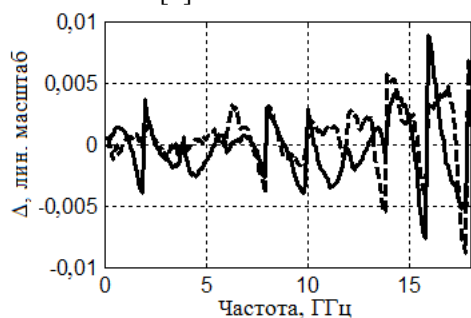


Рис. 6. Разность модулей

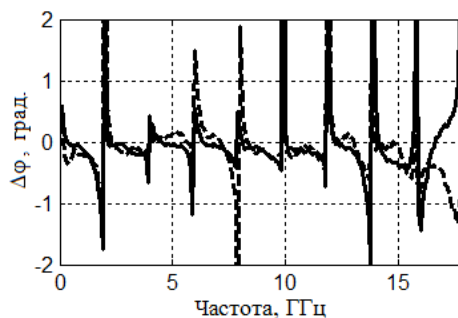


Рис. 7. Разность фаз

На рис. 7 увеличение погрешности по фазе на некоторых участках обусловлено существенным уменьшением уровня отраженного сигнала (см. рис. 2, а). На рис. 8 дополнительно указано максимальное значение  $|\delta|$ , которое найдено в диапазоне до 15 ГГц.

Очевидно, что точность расчета зависит от параметров модели: количества отсчетов ИХ  $I$  и количества точек для интерполяции по частоте  $N$ . Такие исследования были проведены и результаты представлены в табл. 2.

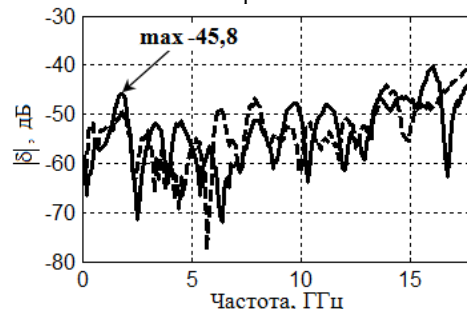


Рис. 8. Модуль разности

Таблица 2

Зависимость максимального значения  $|\delta|$  (дБ) от параметров модели (анализ до 15 ГГц)

$I$	$N$						
	1	2	3	4	5	10	100
2	-12,2	-27	-28,1	-28,1	-28,1	-28,1	-28,1
3	-11,9	-35,5	-32,1	-42,1	-42,1	-42,2	-42,2
4	-11,8	-36,9	-44,5	-45,2	-45,2	-45,3	-45,3
5	-11,8	-37	-44,9	-45,5	<b>-45,8</b>	-45,9	-45,9
6	-11,8	-37	-44,9	-45,5	-45,8	-45,9	-45,9

*Примечание.* При  $N=1$  используются средние значения амплитуды и фазы по всему диапазону; при  $N \geq 2$  точки размещаются равномерно и две точки обязательно на краях диапазона частот. Максимальное значение выбиралось из диапазона до 15 ГГц. Это связано с увеличением влияния остаточной систематической погрешности измерений на частотах выше 15 ГГц.

**Анализ результатов. Выводы.** В данной работе рассмотрена эмпирическая частотно-временная модель канала отраженных сигналов на примере верификационного стандарта Битти. Для составления модели использованы данные высокоточных измерений геометрических размеров. Выполнено сравнение полученных значений КО стандарта с результатами экспериментальных измерений этой величины на ВАЦ.

Выполним краткий анализ данных, приведенных в табл. 2. Неудовлетворительная точность при  $N=1$  объясняется существенным влиянием емкости скачка на результаты измерений. Наличие емкости приводит не только к изменению амплитудных соотношений, но и к дополнительному фазовому сдвигу, различному на разных частотах. Добавление шестого луча ИХ не приводит к увеличению точности расчета. Это можно объяснить тем, что уровень остаточной систематической погрешности измерений ВАЦ существенно выше, нежели вклад данного луча. Причем в рассматриваемых условиях уровень остаточной погрешности составляет примерно минус (45÷50) дБ, что подтверждают данные в табл. 2. При составлении частотно-временной модели важно правильно учесть и количество лучей, и количество точек для интерполяции частотной зависимости. В рассмотренном примере высокоточное описание КО достигнуто с помощью набора из 25 комплексных амплитуд для 5 известных задержек отраженных сигналов.

Стоит отметить, что предложенный подход для описания канала распространения радиоволн применим не только для расчета частотной характеристики. Рассмотренную модель можно использовать как основу для синтеза оптимальных алгоритмов оценивания неизвестных параметров канала (в том числе и задержек сигналов). Для этого может быть применен аппарат марковской теории фильтрации [5]. В рассматриваемом контексте использование данной модели актуально с точки зрения оценки факторов остаточной систематической погрешности измерений (верификация остаточной направленности и остаточного рассогласования источника сигнала). Указанные факторы могут быть локализованы на оси времени и иметь по этой же причине слабовыраженную частотную зависимость. Существующие для этого методы фильтрации (выделения) во временной области при обработке ИХ обладают существенной зависимостью получаемого результата от формы фильтрующего окна и рядом других недостатков. Частотно-временная модель позволяет выделить точное значение задержки до отражателя. Изменение фазовых свойств отражателя при фиксированной задержке характеризует возможные изменения фактического расстояния до неоднородности около основной дальности.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с договором 13.G25.31.0011 от 07.09.2010 и договором 74/10 от 15.07.2010 г. в порядке реализации Постановления №218 Правительства РФ.

#### *Литература*

1. Хибель М. Основы векторного анализа цепей / М. Хибель; под ред. У. Филипп; пер. с англ. С.М. Смольского; – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 500 с.
2. Somlo P.I. Computation of coaxial transmission line step capacitances // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. – 1967. – Vol. MTT-15, № 1. – P. 48–53.
3. Specifying calibration standards and kits for Agilent Vector Network Analyzer, Application Note 1287-11, 2010 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.agilent.com>, свободный (дата обращения: 15.09.2011).
4. Губа В.Г. Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей / В.Г. Губа, А.А. Ладур, А.А. Савин // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24). – С. 149–155.
5. Савин А.А. Синтез квазиоптимального фильтра для оценки временного положения импульсного сигнала известной формы при многолучевом распространении радиоволн / А.А. Савин, В.И. Тисленко // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – № 6. – С. 56–61.

---

#### **Савин Александр Александрович**

Канд. техн. наук, доцент каф. радиотехнических систем ТУСУРа  
Тел.: 8 (382-2) 41-36-70  
Эл. почта: [saasavin@mail.ru](mailto:saasavin@mail.ru)

Savin A.A.

#### **Calculation of the reflection coefficient of a verification Beatty standard using time-frequency model**

We consider the time-frequency model for the calculation of the complex reflection coefficient Beatty standard. The results of the comparison of the calculated values with measurements on the Agilent E8364B instrument in the coaxial path 7,0/3,04 mm.

**Keywords:** reflectivity, verification Beatty standard, frequency response, impulse response, vector network analyzer.