

Имитатор широкополосного канала распространения сигналов

А.А. Савин

ФГБОУ ВПО Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: saasavin@mail.ru

В работе представлена математическая модель широкополосного канала распространения радиоволн. Приведено соответствующее описание верификационного стандарта Битти. Результаты моделирования сравниваются с измерениями на векторном анализаторе цепей. The paper is dedicated mathematical model of broadband channel. Description of verification Beatty standard is presented. Modeling results compare with vector network analyzer measurements.

Линейный канал передачи сигналов может быть полностью определен импульсной характеристикой $h(\tau)$ (ИХ). Для имитации прохождения сигнала произвольной формы $x(t)$ через линейный канал удобно использовать спектральные характеристики: спектр сигнала $S_x(\omega)$ и частотную характеристику канала $K(\omega)$ (ЧХ). Очевидно, что спектр выходного сигнала $y(t)$ равен произведению $S_y(\omega) = S_x(\omega) \cdot K(\omega)$. Алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ) позволяют с минимальными вычислительными затратами обеспечить связь временного и спектрального представлений в дискретной форме.

Рассмотрим широкополосный канал распространения сигналов, который может быть задан ограниченным количеством лучей, что соответствует математическому описанию конечным числом отсчетов ИХ. При записи такой ИХ возникают две сложности. Во-первых, время задержки, соответствующее некоторому лучу, может точно не совпадать с временным положением отсчетов ИХ. Во-вторых, при широкополосном (или, тем более, сверхширокополосном) воздействии свойства тракта, соответствующего некоторому лучу, по ряду причин могут быть частотно-зависимыми. Решение второй проблемы автоматически устраняет первую. Фазовые свойства тракта при определении ЧХ конкретного луча могут устранять недостаток дискретности в значениях времени задержки. Таким образом, при моделировании широкополосного многолучевого канала имеет смысл учитывать ЧХ каждого луча в отдельности.

Пример модели широкополосного канала с I лучами показан на рис. 1.

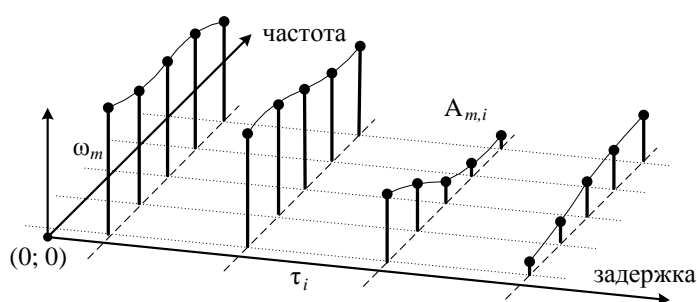


Рис. 1. Модель широкополосного канала распространения сигналов

При описании i -й ($i = 1..I$) луч задается набором из нескольких параметров: время задержки τ_i и M комплексных величин $A_{m,i}$ ($m = 1..M$). Комплексные амплитуды $A_{m,i}$ используются для задания частотных свойств лучей. Значения $A_{m,i}$ определены для частоты ω_m . Расчет амплитуды и фазы i -го луча на произвольной частоте ω_k производится по значениям $A_{m,i}$ с помощью интерполяции кубическими сплайнами.

Формула для нахождения отсчета ЧХ канала на частоте ω_k имеет вид:

$$K(\omega_k) = \sum_{i=1}^I A_i(\omega_k) \cdot \exp[-j\omega_k \tau_i], \quad (1)$$

где $A_i(\omega_k)$ – интерполированное значение комплексной амплитуды i -го луча.

Таким образом, канал задан M комплексными значениями амплитуд и одним действительным значением задержки для I лучей. Требуемое число отсчетов ЧХ (или ИХ) канала для практического применения может быть существенно больше, чем $(M+1) \cdot I$. В этом случае предлагаемая модель позволяет более лаконично и в ряде случаев не менее точно представить линейный многолучевой канал.

Обобщенная структурная схема имитатора широкополосного канала передачи сигналов, использующего рассмотренную модель, приведена на рис. 2.

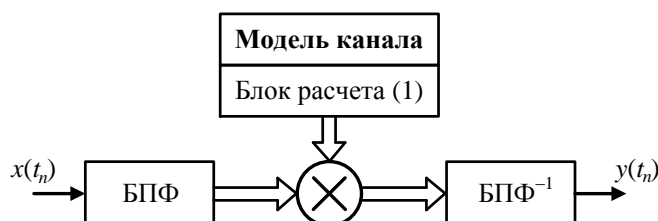


Рис. 2. Обобщенная структурная схема имитатора канала распространения сигналов.

Исследование точности модели в зависимости от детальности ее представления выполним при помощи верификационного стандарта Битти и векторного анализатора цепей (ВАЦ) Agilent Technologies [1]. Измерения комплексного коэффициента отражения (КО) стандарта выполнены в коаксиальном волноводе с диаметрами поперечных сечений (тракте) 7,0/3,04 мм.

Стандарт Битти, применяемый для проверки работоспособности (верификации) 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 [2]. Крайние секции имеют волновое сопротивление 50 Ом, центральная – 25 Ом. Наличие скачкообразных изменений диаметра внутреннего проводника приводит к появлению отраженных волн. Параметры отражений 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, то есть получить точные значения задержек отраженных сигналов τ_i . Однако, из-за наличия емкости разрыва свойства неоднородностей различны на разных частотах [3]. Медленный характер зависимости свойств неоднородностей от частоты позволяет использовать ограниченный набор точек и интерполяцию сплайнами. На рис. 3 показан примерный вид конструкции стандарта Битти (с указанием размеров), схема подключения и три основных сигнала, которые характеризуют отраженные волны. Полагаем, что второй порт стандарта нагружен на идеальную согласованную нагрузку (СН). Это вполне допустимо, если измерения предваряет высокоточная двухпортовая калибровка ВАЦ [4]. Для измерения всех геометрических размеров использованы: нутромер в составе с индикатором часового типа Mitutoyo 2109S-10 с ценой деления 1 мкм, насадкой 526-150 и мерой 7,000 мм; скоба рычажная с ценой деления 1 мкм совместно с концевыми мерами длины плоскопараллельными 3,04 и 4,615 мм; электронный микроскоп MP100 с линзой 50х.

Измерения КО проведены на панорамном ВАЦ Е8364В, то есть последовательно на разных частотах при помощи гармонического зондирования. Условия измерений: диапазон частот от 10 МГц до 18 ГГц (1800 точек); полоса фильтра промежуточной частоты 1 кГц; уровень сигнала -15 дБм. На рис. 4 приведены результаты измерений в частотной и временной областях. При выполнении преобразования Фурье для перехода во временную область использовано окно Хемминга.

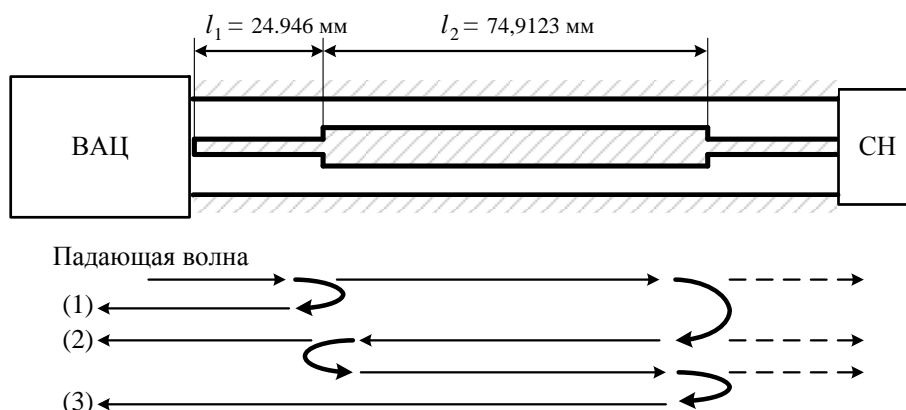


Рис. 3. Схема подключения и три основных сигнала при измерении КО стандарта Бигги.

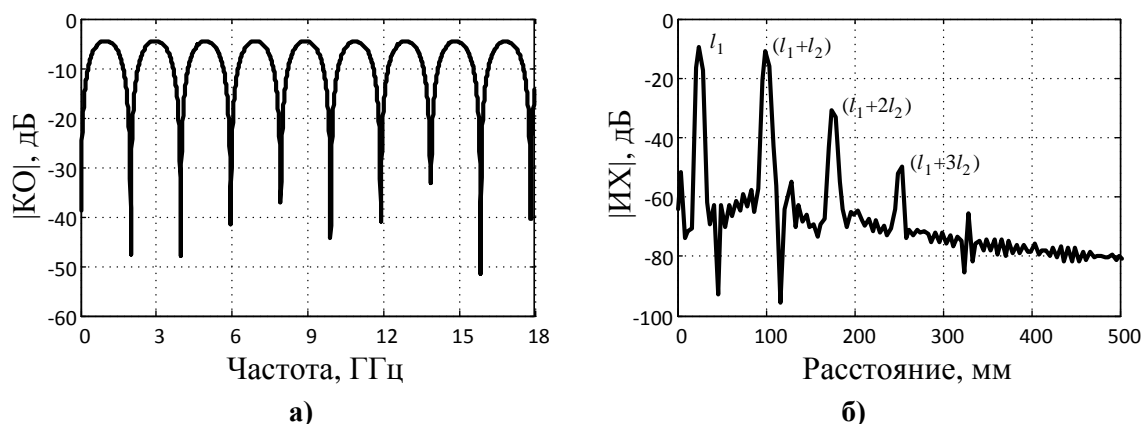


Рис. 4. Частотная (а) и импульсная (б) характеристики стандарта Бигги.

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

$$\tau_i = [2l_1 + 2l_2 \cdot (i - 1)]/c, \quad i = 1, 2, \dots, I, \dots \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме.

Амплитуда волны, отраженной от скачка волнового сопротивления с 50 до 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 рассматриваемом режиме составляет порядка -90 дБ. Таким образом, для составления

прецизионной модели стандарта Битти во временной области можно ограничиться $I=6$ отсчетами ИХ. Для каждого отсчета рассчитана парциальная ЧХ. При проведении расчетов учтено затухание в подводящих линиях и влияние емкости скачка [3]. Медленный характер изменения полученных ЧХ позволяет ограничиться $M=10$.

На рис. 5 приведен модуль разности $|\delta|$, который определен по формуле:

$$|\delta| = |\Gamma_M - \Gamma_C|, \quad (3)$$

где Γ_C – расчетное значение КО, полученное при помощи (1) для $I=5$ и $N=5$ при интерполяции кубическими сплайнами;

Γ_M – измеренное значение КО, полученное на ВАЦ E8364B (сплошная линия на рис. 5).

Кроме этого результаты расчетов сравнивались с опорными данными описания стандарта (пунктирная линия на рис. 5), которые приводятся на электронном носителе в верификационном комплекте [1].

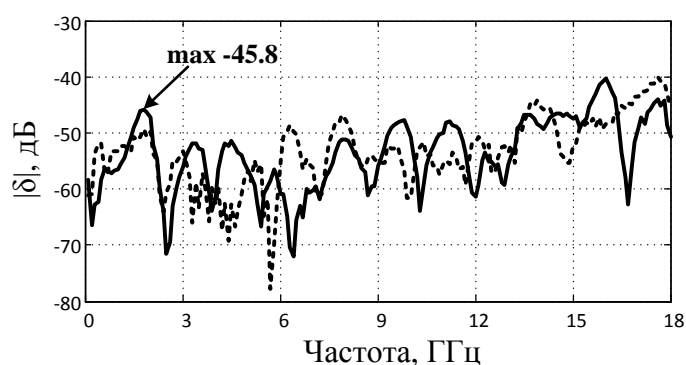


Рис. 5.

На рис. 5 указано максимальное значение $|\delta|$, которое найдено в диапазоне до 15 ГГц. Выполнены исследования точности модели (1) в зависимости от ее параметров: количества отсчетов ИХ I (от 2 до 6) и количества точек интерполяции M (от 1 до 100). Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость максимального значения $|\delta|$ (дБ) от параметров модели

I	M						
	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	-45.8	-45.9	-45.9
6	-11.8	-37	-44.9	-45.5	-45.8	-45.9	-45.9

Примечание: при $M=1$ используется средние значения амплитуды и фазы по всему диапазону; при $M \geq 2$ точки размещаются равномерно и две точки обязательно на краях диапазона частот. Выбор максимального значения из диапазона до 15 ГГц связан с существенным увеличением влияния остаточной систематической погрешности измерений на частотах выше 15 ГГц.

В заключение сделаем несколько важных замечаний. 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 измерений на ВАЦ.

Проведем краткий анализ данных таблицы 1. Неудовлетворительная точность при $M=1$ 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. В соответствии с метрологическими характеристиками прибора и калибровочного набора уровень остаточной погрешности составляет примерно минус $(45 \div 50)$ дБ, что подтверждают данные в таблице 1. При составлении модели важно правильно учесть как количество лучей, так 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 передачи сигналов (в том числе радиосигналов) применим не только для расчета характеристик. Работа является продолжением и развитием ряда работ, в том числе [5]. Данное направление предполагает разработку моделей, которые удобны для практического применения в прикладных задачах радиолокации, радионавигации и векторных измерений на СВЧ. Рассмотренную модель и имитатор можно использовать как основу для синтеза оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов оценивания неизвестных параметров канала, например, с помощью аппарата марковской теории фильтрации [6, 7]. Модель подходит для решения задачи оценки ЧХ факторов остаточной систематической погрешности ВАЦ, которые могут быть локализованы на оси времени и иметь по этой же причине слабовыраженную частотную зависимость. Существующие в настоящее время методы фильтрации (выделения или подавления) во временной области при обработке ИХ обладают существенной зависимостью получаемого результата от формы фильтрующего окна и рядом других недостатков.

Литература

1. 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).
2. Хибель М. Основы векторного анализа цепей / Михаэль Хибель; под ред. У. Филипп; пер. с англ. С.М. Смольского. – М: Изд. дом МЭИ, 2009. – 500 с.
3. 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.
4. Губа В.Г., Ладур А.А., Савин А.А. Классификация и анализ методов калибровки векторных анализаторов цепей // Доклады ТУСУР. – 2011. – № 2 (24). – С. 149–155.
5. Савин А.А., Тисленко В.И. Имитационное моделирование многолучевого канала распространения радиоволн с целью анализа искажений широкополосных сигналов // Материалы Всероссийской научной конференции-семинара "Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике" (СШП-СРСА'2003), – Муром, 2003.
6. Савин А.А. Синтез квазиоптимального фильтра для оценки временного положения импульсного сигнала известной формы при многолучевом распространении радиоволн / А.А. Савин, В.И. Тисленко // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – № 6. – С. 56–61.
7. А. А. Савин. Алгоритм оценки частотных свойств отдельных отражателей при недостаточном разрешении во временной области. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2013. N1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/15/text.pdf>.