

УДК 621.317.08

А.А. Савин

Выбор длины линии для разделения эффективных параметров векторного анализатора цепей во временной области

Получено простое расчетное соотношение, позволяющее определить длину верификационной линии, которая необходима для достоверной верификации векторного анализатора цепей. Рассмотрены примеры расчета.

Ключевые слова: векторный анализатор цепей, верификация, линия передачи, диаграмма во временной области, боковой лепесток.

Особенности верификации векторного анализатора цепей. Точность измерений векторных анализаторов цепей (ВАЦ) характеризуется составляющими неисключенной систематической погрешности (эффективными параметрами). Основным методом установления точности измерений ВАЦ на подложке принято считать метод сравнения калибровок [1]. Этот метод предполагает наличие эталонного калибровочного набора. При выполнении измерений на подложке наиболее точной является калибровка multiline TRL [2]. В коаксиальном волноводе также принято использовать подобную калибровку. Для построения эталонного набора на основе калибровки из семейства TRL требуется множество прецизионных линий передачи различной длины. Между тем эффективные параметры могут быть определены при помощи всего одной линии. Это достигается за счет разделения и фильтрации во временной области [3–8]. В работе [3] рассмотрен метод совместной оценки эффективных параметров однопортового ВАЦ. Метод основан на специальной математической модели прибора. Эффективные параметры задаются набором комплексных отсчетов, которые используются для интерполяции частотных характеристик эффективных параметров во всех частотных точках измерений. Оценки неизвестных отсчетов формируются квазиоптимальным алгоритмом сигма-точечного фильтра Калмана. В качестве наблюдений используются измерения комплексного коэффициента отражения короткозамкнутой воздушной линии в рабочей полосе частот калиброванного ВАЦ. В результате эффективные параметры, составляющие математическую модель искажающего адаптера в плоскости порта ВАЦ, оказываются разделенными во временной области. Проведенные исследования показали, что разработанный метод способен формировать точные оценки эффективных параметров при уменьшении полосы частот [4], т.е. при снижении разрешения во временной области. Предложенный в [3] метод был расширен на случай верификации двухпортового ВАЦ в коаксиальном волноводе [5]. Для применения синтезированных алгоритмов в задаче верификации ВАЦ в копланарном волноводе (на пластине) была разработана специальная процедура адаптации к неизвестным параметрам верификационных стандартов. Верификационные пластины, как правило, не содержат короткозамкнутой линии, поэтому приходится использовать линию с открытым концом. Параметры открытого конца (режим холостого хода) не могут быть рассчитаны с приемлемой точностью. Алгоритм адаптации к неизвестным параметрам верификационных стандартов приведен в [6]. В дальнейшем для снижения вычислительных затрат был синтезирован упрощенный алгоритм верификации на основе метода наименьших квадратов [7]. Вычислительные затраты данного алгоритма соизмеримы с традиционным алгоритмом, который предполагает выделение каждого эффективного параметра с помощью окна во временной области. Сравнение оценок традиционного алгоритма с оценками алгоритма на основе фильтра Калмана приведено в [3]. В работе [8] показано, что при использовании линии большей длины формируются более точные оценки традиционным алгоритмом и выбрано оптимальное окно для выделения (фильтрации) эффективных параметров. Верификационная линия является эталоном волнового сопротивления. Очевидно, что чем больше длина линии, тем сложнее ее изготовить. По этой причине возникает задача определения минимально необходимого размера линии. Для решения данной задачи проведем анализ условий при верификации однопортового ВАЦ.

Систематическая погрешность измерений одного порта ВАЦ определяется одной составляющей высокого уровня (частотная неравномерность коэффициента передачи тракта отраженных сигналов) и двумя составляющими низкого уровня (эффективная направленность порта и согласование источника сигнала). Как уже было отмечено, верификационным стандартом для оценки эффективных параметров одного порта ВАЦ может быть линия передачи, работающая в режиме короткого замыкания (КЗ) или холостого хода (ХХ) на конце, который не подключен к прибору. Основным сигналом такого стандарта определен отражением от КЗ или ХХ и содержит информацию о составляющей высокого уровня. Как правило, амплитудный спектр частотной неравномерности близок к 0 дБ во всей полосе работы ВАЦ. В результате параметры низкого уровня должны быть различимы во временной области на фоне боковых лепестков, созданных основным сигналом. Уровень эффективной направленности и эффективного согласования порта в режиме источника для большинства современных калиброванных ВАЦ не превышает минус 30 дБ.

Боковые лепестки во временной области формируют высокочастотные составляющие в частотной области. Высокий уровень боковых лепестков основного сигнала в окрестности появления сигнала низкого уровня приведет к искажению оценок частотных характеристик эффективных параметров, особенно в области более высоких частот. Наиболее чувствительным к этим искажениям является традиционный алгоритм, для которого крайне важным является выбор формы оконной функции. Более того, в отличие от совместной обработки, при выделении окном снижается вклад собственных боковых лепестков в итоговую оценку. Чем дальше друг от друга во временной области располагаются информативные сигналы, тем ниже степень влияния боковых лепестков и тем дальше на оси частот проявляются артефакты [8].

Определим закон изменения уровня боковых лепестков от задержки сигнала (расстояния) и в зависимости от полосы работы ВАЦ. Это необходимо для выбора длины линии, минимальной и достаточной при верификации однопортового ВАЦ во временной области. Отметим, что при совместной верификации двух портов ВАЦ (линия подключается на проход к двум портам одновременно) присутствуют всего два информативных сигнала – направленность одного порта и согласование другого порта в режиме приемника, которые являются параметрами низкого уровня и в малой степени влияют друг на друга.

Оценка уровня боковых лепестков диаграммы во временной области. Допустим, что частотная характеристика неравномерности строго равна 1 в диапазоне частот от $-\omega_m$ до $+\omega_m$, где ω_m – максимальная рабочая частота ВАЦ. Тогда аналитическое представление сигнала во временной области можно определить с помощью обратного преобразования Фурье:

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_m}^{+\omega_m} \exp(j\omega t) d\omega = \frac{\sin(\omega_m t)}{\pi t} = 2f_m \frac{\sin(\omega_m t)}{\omega_m t}, \quad (1)$$

где t – время задержки сигнала; f_m – максимальная линейная частота ВАЦ. Уровень основного лепестка функции (1), т.е. при $t \rightarrow 0$, составляет $2f_m$. Функция синуса формирует формы основного и боковых лепестков. Уровень боковых лепестков определяется функцией $1/\omega_m t$. С учетом всех изложенных соображений уровень боковых лепестков диаграммы во временной области (1) по отношению к основному лепестку в логарифмическом масштабе можно записать в виде

$$S(t) = 20 \cdot \lg(1/2\pi f_m t). \quad (2)$$

Формулу (2) следует использовать при $t > 1/(2f_m)$.

Для примера на рис. 1 толстой линией (кривая 1) показаны результаты расчетов по (2). Тонкой линией (кривая 3) приведена экспериментальная диаграмма во временной области при верификации первого порта ВАЦ. Эксперимент выполнен при помощи ВАЦ E8364B производства компании Agilent Technologies. Условия измерений: воздушный коаксиальный волновод с диаметром поперечного сечения 3,5 мм (граничная частота около 34 ГГц); диапазон частот от 10 МГц до 32 ГГц с шагом 10 МГц ($f_m = 32$ ГГц); тип калибровки – на три нагрузки с известными параметрами; полоса фильтра промежуточной частоты 1 кГц; длина верификационной линии 75 мм; длина нагрузки КЗ около 9 мм. Пунктирными линиями на рис. 1 показаны кривые зависимости уровня боковых лепестков, помещенные в окрестность удвоенной длины верификационного стандарта.

Пересчет времени задержки в расстояние выполнен по простой формуле:

$$r = t \cdot c / \sqrt{\epsilon}, \quad (3)$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме; ϵ – эффективная диэлектрическая проницаемость среды. При использовании воздушного коаксиального волновода $\epsilon = 1$. Необходимо отметить, что рас-

стояние до основного сигнала определяется двукратным прохождением сигнала через верификационный стандарт (в прямом и обратном направлениях).

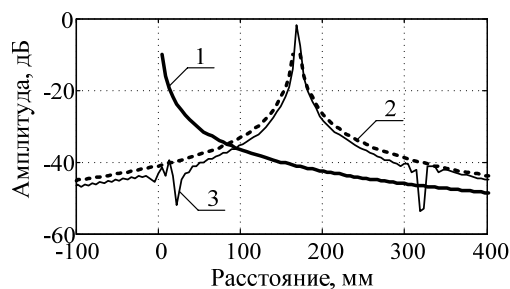


Рис. 1. Зависимость уровня боковых лепестков диаграммы во временной области от расстояния (кривая 1), уровень боковых при смещении на 168 мм (кривая 2) и экспериментальная диаграмма во временной области (кривая 3)

Таким образом, верификационная линия длиной 75 мм обеспечивает необходимый уровень боковых лепестков. Сравнение оценок эффективных параметров традиционного алгоритма фильтрации и метода на основе сигма-точечного фильтра Калмана приведено в [3]. Показано, что совместное оценивание дает лучшие результаты. Следует также отметить, что в состав верификационного набора производства Agilent Technologies для волновода с сечением 2,4 мм (граничная частота около 52 ГГц) включена линия длиной 50 мм. Расчеты по (2) показывают, что при полосе 50 ГГц на расстоянии 100 мм уровень боковых также около минус 40 дБ.

Условие выбора длины линии для верификации на пластине. Для тестирования полупроводниковых приборов могут использоваться различные измерительные системы, в том числе различные ВАЦ. Рассмотрим для примера три ВАЦ с диапазонами частот 40, 70 и 110 ГГц. На рис. 2 показана зависимость уровня боковых лепестков (2) от задержки сигнала при двукратном прохождении верификационной линии.

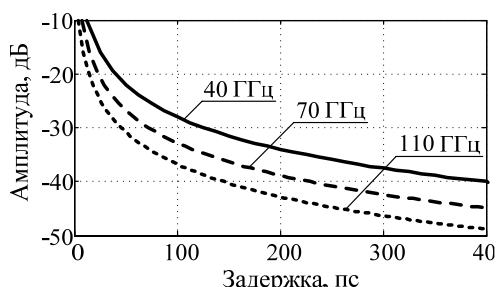


Рис. 2. Зависимость уровня боковых лепестков диаграммы во временной области от задержки сигнала для различной ширины диапазона частот ВАЦ

Значение минус 40 дБ достигается при задержке около 400 пс для диапазона частот до 40 ГГц; 228 пс – для диапазона до 70 ГГц и 145 пс для самого широкополосного прибора с диапазоном частот до 110 ГГц.

Найдем расчетную формулу для определения требуемой длины линии, необходимой для снижения уровня боковых лепестков в районе эффективных параметров низкого уровня до значения минус 40 дБ (0,01 в линейном масштабе). Для этого следует выражение в скобках (2) приравнять значению 0,01. Затем с помощью (3) выразить t через r и учесть, что расстояние r примерно соответствует двукратному прохождению сигнала по линии. В итоге длину верификационной линии l можно рассчитать по формуле

$$l = \frac{25c}{\pi f_m \sqrt{\epsilon}} \quad (4)$$

Проведем несколько характерных расчетов по (4). Результаты в зависимости от полосы частот ВАЦ и эффективной диэлектрической проницаемости среды представлены в таблице.

Длина верификационной линии

ϵ (материал)	1 (воздух), мм	5,1 (Al_2O_3), мм	7,1 (GaAs), мм
Полоса ВАЦ, ГГц	32	74,6	33
	40	59,6	26,4
	50	47,7	21,1
	70	34,1	15,1
	110	21,7	9,6
			8,1

Значения эффективной диэлектрической проницаемости оксида алюминия и арсенида галлия соответствуют реальным верификационным пластинам в копланарном волноводе. В работе [5] выполнен эксперимент на пластине из оксида алюминия в диапазоне частот до 40 ГГц. Получены вполне достоверные оценки эффективных параметров алгоритмом сигма-точечного фильтра Калмана при обработке измерений коэффициента отражения линии длиной 5,25 мм с открытым концом. При этом для реализации традиционного алгоритма требуется линия длиной 26,4 мм. Следующий эксперимент, рассмотренный в [6], показал, что оценки эффективных параметров при использовании разных линий практически совпадают. Эксперимент выполнен на пластине из арсенида галлия в диапазоне до 70 ГГц. Были использованы линии длиной 6,5 и 19,7 мм. Для традиционного алгоритма требуется линия длиной не менее 12,8 мм. В экспериментальной части работы [7] показаны результаты верификации ВАЦ в полосе частот до 110 ГГц с применением линии длиной 8,25 мм на пластине из оксида алюминия. Алгоритм совместной оценки на основе метода наименьших квадратов позволяет определить эффективные параметры даже при условии, что длина линии меньше необходимой (по данным табл. 1 требуется линия длиной 9,6 мм).

В завершение сделаем ряд важных замечаний. Эффективные параметры ВАЦ незначительно меняются с изменением частоты и поэтому во временной области имеют некоторую протяженность, что может привести к увеличению минимально необходимой длины линии. Расчеты по (4) дают нижнюю границу длины, которая требуется для использования традиционного алгоритма определения эффективных параметров во временной области. Однако алгоритмы совместной обработки позволяют получить достоверные оценки и при меньшей длине линии. Следует также отметить, что при переходе из частотной области во временную область могут быть использованы оконные функции, позволяющие снизить уровень боковых лепестков с одновременным расширением основного лепестка. Однако в этом случае выделение или подавление отдельных сигналов во временной области не приведет к правильному определению их частотных свойств. В современных ВАЦ приемы снижения боковых лепестков используются только для улучшения наглядности отображения параметров исследуемой цепи во временной области.

Заключение. В работе рассмотрены соображения по выбору длины верификационной линии. Формула (4) позволяет для заданной измерительной установки (полосы ВАЦ) определить необходимую для достоверной верификации длину линии. Формула получена при условии снижения боковых лепестков основного сигнала до минус 40 дБ, что позволяет точно оценить эффективные параметры низкого уровня. Приведены результаты расчета необходимой длины верификационной линии для воздушного волновода и копланарного волновода на полупроводниковой или диэлектрической подложке. Технология изготовления эталонной линии на пластине должна обеспечить качественное производство линии необходимой длины. Для верификации ВАЦ в диапазоне до 110 ГГц требуется линия длиной около 10 мм.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-3107.2015.8.

Литература

1. Williams D.F. Comparison of on-wafer calibration / D.F. Williams, R.B. Marks, A. Davidson // Proceedings of the 38-th ARFTG Conference. – 1991. – P. 68–81.
2. Marks R.B. A multi-line method of network analyzer calibration // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1991. – Vol. 39, issue 7. – P. 1205–1215.
3. Savin A.A. A Novel Factor Verification Technique for One-Port Vector Network Analyzer // Proceedings of the 43rd European Microwave Conference. – Nuremberg, Germany, 2013. – P. 60–63.
4. Savin A.A. Residual Errors Determinations for Vector Network Analyzer at a Low Resolution in the Time Domain / A.A. Savin, V.G. Guba, B.D. Maxson // Proceedings of the 82-nd ARFTG Microwave Measurement Conference. – Columbus, USA, 2013. – P. 15–19.
5. Savin A.A. Estimation of Complex Residual Errors of Calibrated Two-Port Vector Network Analyzer / A.A. Savin, V.G. Guba, A. Rumiantsev, B.D. Maxson // Proceedings of the 83-rd ARFTG Microwave Measurement Conference. – Tampa, USA, 2014. – P. 1–4.
6. Savin A.A. Adaptive Estimation of Complex Calibration Residual Errors of Wafer-Level S-Parameters Measurement System / A.A. Savin, V.G. Guba, A. Rumiantsev, B.D. Maxon, D. Schubert, U. Arz // Proceedings of the 84th ARFTG Microwave Measurement Conference. – Boulder, USA, 2014. – P. 1–4.
7. Савин А.А. Линейная обработка верификационных измерений векторного анализатора цепей в составе зондовой станции // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 3(33). – С. 53–57.

8. Mubarak F., Rietveld G. Residual error analysis of a calibrated vector network analyzer // Proceedings of the 84th ARFTG Microwave Measurement Conference. – Boulder, USA, 2014. – P. 1–6.

Савин Александр Александрович

Канд. техн. наук, начальник научного управления ТУСУРа

Тел.: +7-952-806-20-96

Эл. почта: savin@tusur.ru

Savin A.A.

Choice of the line length to separate residual errors of vector network analyzer in the time domain

A simple calculation formula is obtained to determine the length of the verification line that is needed to verify the accuracy of a vector network analyzer. The examples of calculations are considered.

Keywords: vector network analyzer, verification, line, time domain diagram, side lobe.
