

УДК 621.317.08

**МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ
ПЕРЕДАЧИ. ТЕСТИРОВАНИЕ КАБЕЛЬНЫХ
СОЕДИНИТЕЛЕЙ С ПРОСТРАНСТВЕННО-
РАЗНЕСЁННЫМИ СОЕДИНИТЕЛЯМИ**

В.Г. Губа, О.Н. Быкова, А.А. Савин, С.А. Заостровных

*ООО «НПК ТАИР», Томск; ТУСУР, Томск; ООО «Планар», Челябинск
vovg80@gmail.com,
elyssia.bon@gmail.com,
saasavin@mail.ru,
welcome@planarchel.ru*

Данная работа является комбинацией инженерного подхода, метрологии и науки. Рассмотрен метод тестирования и измерения параметров рассеяния кабельных соединений с пространственно-разнесёнными соединителями при помощи векторного анализатора цепей и автономного модуля автоматической калибровки. Разработаны алгоритм обработки результатов измерений и формирования оценок, управляющее программное обеспечение, а также программное обеспечение для исследования метрологических характеристик предлагаемого метода. Проведены экспериментальные исследования метода при тестировании двухпортовых и четырёхпортовых линий передачи.

Ключевые слова: методы измерения, линии передачи, пространственно-разнесённые соединители, тестирование кабельных соединений.

**METHODS OF MEASUREMENT THE TRANSMISSION-LINE
PARAMETERS. TESTING THE CABLE CONNECTORS
WITH SPATIALLY DIFFERENT CONNECTORS**

V.G. Guba, O.N. Bykova, A.A. Savin, S.A. Zaostorvnykh

*ООО НПК ТАИР, Томск; ТУСУР, Томск; ООО Planar, Chelyabinsk
vovg80@gmail.com,
elyssia.bon@gmail.com,
saasavin@mail.ru,
welcome@planarchel.ru*

This paper is a combination of engineering approach, metrology and science. The method of testing and measuring the scattering parameters of cable connections with spatially separated connectors using a vector network analyzer and an autonomous module of automatic calibration is considered. An algorithm has been developed for processing measurement results and generating estimates, control software, as well as software for studying the metrological characteristics of the proposed method. Experimental studies of the method were performed when testing two-port and four-port transmission lines.

Key words: measurement methods, transmission lines, spatially separated connectors, testing the cable connections.

Введение

Измерения параметров электрических цепей принято выполнять при помощи векторных анализаторов цепей (ВАЦ). Прежде всего это связано с высокой точностью векторных измерений всех элементов матрицы рассеяния, которая полностью определяет свойства линейных СВЧ устройств. Однако не для всех практических задач удобно применять ВАЦ, например, при тестировании кабельных соединений с целью проверки их качества после прокладки. Соединители могут располагаться на значительном удалении друг от друга, и для работы ВАЦ потребуется использовать дополнительные кабельные сборки большой длины, что может привести к неконтролируемому росту погрешности измерений. Поэтому для решения таких задач нередко используют дорогостоящие приборы: импульсные генераторы и высокочастотные осциллографы, позволяющие получить некоторую оценку формы глазковой диаграммы исследуемой линии передачи [1]. Подчеркнём, что построить глазковую диаграмму можно при помощи известной матрицы рассеяния. При этом погрешность измерений матрицы рассеяния может быть пересчитана в погрешность оценки формы и параметров глазковой диаграммы.

В данной работе предлагается метод тестирования кабельных соединений с пространственно-разнесёнными соединителями при помощи ВАЦ, который не требует использования дополнительных кабельныхборок в составе измерительной системы. Задача измерения решается за счёт применения автономного (переносного) модуля автоматической калибровки (automatic calibration module, АСМ) (рис. 1).

Автоматический калибровочный модуль

Специально разработанный (автономный) автоматический калибровочный модуль (АСМ) предлагается использовать для выполнения измерений.



Рис. 1. Автоматический калибровочный модуль (АСМ)

АСМ предназначены для выполнения n -портовой калибровки ВАЦ в автоматическом режиме. В процессе калибровки к измерительным портам ВАЦ последовательно подключаются внутренние меры (состояния) АКМ. Для расчёта калибровочных коэффициентов используются измеренные S -параметры мер и сохранённые в памяти АКМ исходные характеризованные данные.

Автономный АСМ состоит из:

- стандартного АСМ для калибровки ВАЦ в автоматическом режиме;
- внутреннего источника питания для автономной работы без подключения кабелей питания и управления;
- программного обеспечения для совместного управления ВАЦ и АСМ;
- системы синхронизации, которая является основой данного модуля. Эта система очень важна, поскольку перед измерением ВАЦ должен знать всё об используемом АСМ: модель, скорость переключения, параметры мер и серийный номер. Синхронизация осуществляется посредством модуляции сигнала ВАЦ мерами АСМ.

Внутренний источник питания позволяет работать без подключения кабелей питания и управления.

Синхронизация обеспечивает синхронную работу двух устройств. Синхронизация осуществляется посредством модуляции сигнала ВАЦ мерами АСМ.

Программное обеспечение управляет ВАЦ, синхронно собирает данные при переключении мер АСМ и производит расчёт элементов матрицы рассеяния кабельной сборки.

Процесс измерений обычных и дифференциальных кабельныхборок включает два этапа: подготовку и непосредственно измерение.

После подключения АСМ, программное обеспечение выполняет синхронизацию, калибровку ВАЦ и сохранение данных.

Стоит обратить внимание на то, что для тестирования двухпортовых кабелей требуется однопортовый прибор.

После подключения АСМ в соответствии с приведённой схемой (рис. 2), программное обеспечение снова выполняет синхронизацию, калибровку ВАЦ второго уровня и вычисляет 4 параметра кабеля согласно 3-параметрической модели ошибок. Использование метода наименьших квадратов позволяет использовать большее количество мер при калибровке. Избыточность измерений приводит к более точному результату.

Чтобы измерить параметры дифференциального кабеля, нужно использовать двухпортовый ВАЦ (четырёхпортовый кабель и двухпортовый прибор).

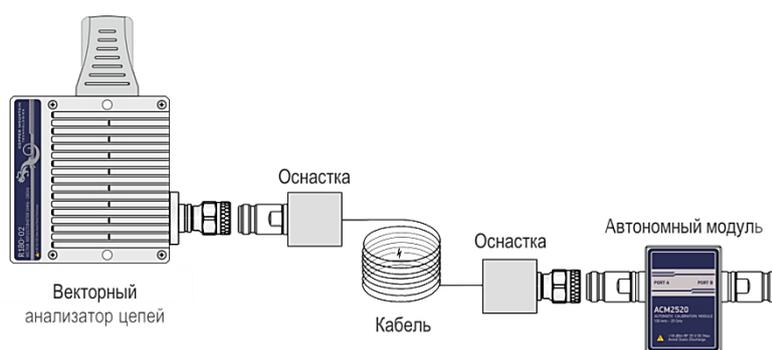


Рис. 2. Схема подключения АСМ

После подключения АСМ программное обеспечение выполняет синхронизацию, калибровку ВАЦ и сохранение данных.

АСМ должен иметь описание в конфигурации, позволяющей соединение с ВАЦ и оснасткой.

После подключения АСМ в соответствии с приведённой на рис. 3 схемой, программное обеспечение снова выполняет синхронизацию, калибровку ВАЦ второго уровня и вычисляет 16 параметров кабеля согласно 16-параметрической модели ошибок (12-параметрическая модель плюс паразитные проникновения). Формула для расчёта: $X = (C^H \cdot R \cdot C)^{-1} \cdot C^H \cdot R \cdot t$. Для повышения точности используется взвешенный метод наименьших квадратов. Матрица R в формуле — обратная ковариационная матрица, содержащая весовые коэффициенты.

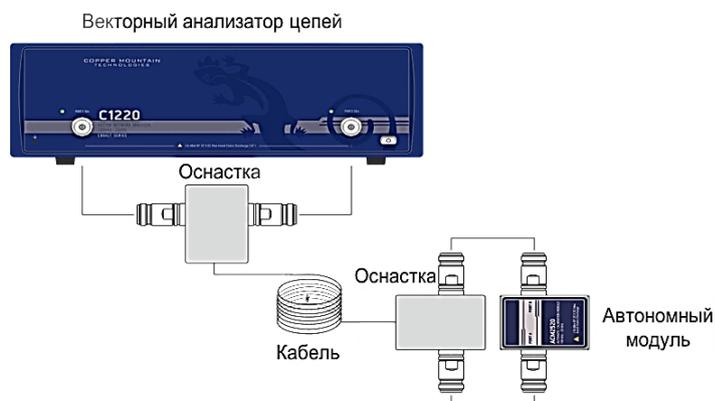


Рис. 3.

Чтобы вычислить ковариационную матрицу, необходимо решить представленный на рис. 4 граф и знать приблизительные значения параметров калиброванного ВАЦ, погрешностей описания АКМ, коэффициентов передачи и отражения кабеля.

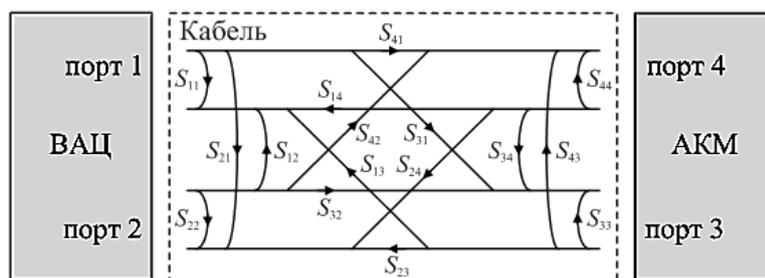


Рис. 4. Сигнальный потоковый граф для вычисления ковариационной матрицы. Алгоритм расчёта встроен в программное обеспечение

Это можно выполнить в процессе расширенной калибровки итерационным методом.

Описание предлагаемого метода

Метод измерений, предлагаемый в настоящей статье, предназначен для расширения возможностей уже существующих методов.

Основная идея предлагаемого метода заключается в подключении тестируемого кабельного соединения к ВАЦ со стороны одного соединителя и к АСМ со стороны второго соединителя. Схематично это показано на рис. 5. Информация о текущем состоянии автономного АСМ формируется в ВАЦ после синхронизации работы этих приборов. Синхронизация осуществляется сразу после подключения к кабельному соединению посредством модуляции сигнала ВАЦ мерами АСМ. АСМ содержит два коаксиальных порта. На каждом порту АСМ может быть установлено не менее трёх различных мер с известными параметрами. Кроме этого, имеется возможность установить АСМ в состояние перемычки между портами с известными параметрами.



Рис. 5. Схема подключения приборов и тестируемого кабельного соединения

Данный способ измерения параметров рассеяния допускает измерения параметров обычных кабельных сборок. Для этого необходим однопортовый ВАЦ (рефлектометр) и достаточно задействовать один любой порт АСМ (рис. 6). Для измерения параметров дифференциальных кабельных соединений необходимы двухпортовый ВАЦ и оба порта АСМ (рис. 7). При использовании традиционного (обычного) способа измерений на ВАЦ в этих случаях потребовались бы двухпортовый и четырёхпортовый приборы соответ-

ственно. Для подключения тестируемого кабельного соединения к ВАЦ и АСМ часто требуются адаптеры или переходы. На рис. 6 и 7 они не указаны и являются частью исследуемого устройства (ИУ). Если параметры адаптеров известны, то несложно выполнить их исключение.

Перед выполнением измерений параметров ИУ должна быть выполнена калибровка ВАЦ, состояния АСМ должны быть охарактеризованы. Процесс измерений предполагает получение измерений коэффициента отражения (для схемы рис. 6) или измерений полной матрицы рассеяния (для схемы рис. 7) на каждой частоте ВАЦ и при различных состояниях АСМ. Обработка полученного на некоторой частоте набора измерений осуществляется по формуле метода наименьших квадратов (МНК):

$$X = (C^H \cdot R \cdot C)^{-1} \cdot C^H \cdot R \cdot m, \quad (1)$$

где X — вектор параметров ИУ; m — вектор полученных измерений (в произвольном порядке); C — матрица наблюдений системы (строки должны следовать в порядке, соответствующем вектору m); H — оператор Эрмитава сопряжения; R — матрица весовых коэффициентов. При работе по схеме рис. 6 необходимо иметь минимум 3 однопортовых измерения: порт АСМ в положениях Short, Open, Load. Не исключён вариант использования нескольких мер Short различной длины или других, в том числе с целью получения избыточности измерений. При работе по схеме рис. 7 обязательно наличие перемычки между портами АСМ: мера Thru. Тогда возможны 10 двухпортовых измерений (схема рис. 7): 9 различных комбинаций с мерами Short, Open, Load на разных портах АСМ и измерение меры Thru.

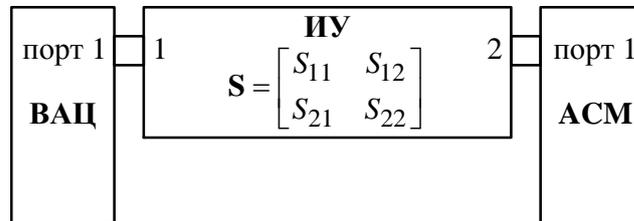


Рис. 6. Схематичное представление измерительной системы при тестировании обычных кабельных соединений

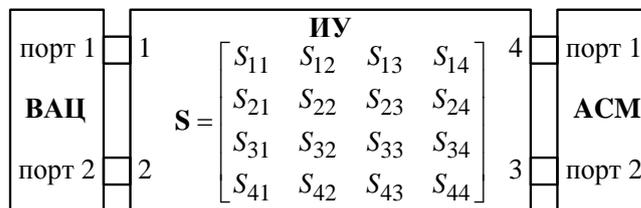


Рис. 7. Схематичное представление измерительной системы при тестировании дифференциальных кабельных соединений

В основе построения матрицы C для измерений по схеме рис. 6 лежат известные соотношения однопортовой калибровки VNA [1]. Строка матрицы C равна:

$$C_i = [\Gamma_i^A \quad 1 \quad -\Gamma_i^A \cdot \Gamma_i^M], \quad (2)$$

где индексами A и M указаны действительное значение коэффициента отражения i -ой меры АСМ и соответствующий результат измерений. Чтобы сформировать матрицу C для измерений по схеме рис. 7, удобно воспользоваться методологией двухпортовой калибровки ВАЦ в рамках 16-параметрической модели систематической погрешности, рассмотренной в работе [2]. Матрица C в таком случае будет иметь 4 разные строки для каждого состояния АСМ, а некоторые элементы вектора m будут нулевыми [2].

Матрица весовых коэффициентов R равна:

$$R = K_n^{-1}. \quad (3)$$

Элементы ковариационной матрицы погрешностей измерений K_n могут быть рассчитаны для заданной в векторе m последовательности измерений при известных значениях эффективных параметров ВАЦ, известном уровне шума измерений и известных погрешностях описания мер АСМ. Кроме этого, для расчёта матрицы K_n необходимо знать тип ИУ: примерный уровень коэффициентов отражения и передачи. При отсутствии избыточных измерений матрица R не оказывает влияние на оценку (1).

Отметим одно важное обстоятельство, связанное с реализацией предлагаемого метода на примере схемы рис. 6. Все измерения зависят от произведения $S_{21}S_{12}$. Поэтому для нахождения коэффициента передачи в одном направлении необходимо, чтобы ИУ было взаимным. Правильность выбора знака перед корнем квадратным гарантируется настройкой частотного плана ВАЦ и априорной информацией о параметрах ИУ. Для схемы рис. 7 ситуация несколько иная, но тем не менее также требуется равенство некоторых коэффициентов передачи ИУ. Оценки матрицы S -параметров размерностью 4×4 , полученные из измерений по схеме рис. 7, могут быть пересчитаны в дифференциальные параметры. Формулы пересчёта можно найти в [3].

Исследование метрологических характеристик предлагаемого метода

С целью исследования метрологических характеристик предлагаемого метода было разработано специальное программное обеспечение. Определение максимальной погрешности измерений параметров ИУ в двух схемах выполнено методом статистических испытаний (Монте-Карло). Для получения достоверных результатов число испытаний составляет 10^4 . В каждом испытании задаются случайные условия работы измерительной системы. Порядок работы программы расчёта следующий. На начальном

этапе задаются свойства некалиброванного ВАЦ и свойства набора мер для калибровки. Описания калибровочных мер имеют погрешности. Далее выполняется калибровка ВАЦ и включается режим коррекции. Затем происходит формирование измерений параметров ИУ совместно с АСМ и расчёт по (1). Описания мер АСМ также имеют погрешности. При формировании измерений используются действительные значения, а при расчёте оценок используются значения, заданные с погрешностью. Случайная погрешность измерений ВАЦ присутствует в каждом измерении. На последнем этапе работы программы выполняется расчёт погрешности оценок всех параметров ИУ, нахождение максимальных значений погрешности и отображение результатов. Главным преимуществом имитационного математического моделирования является то, что действительные параметры ИУ известны.

Рассмотрим некоторые результаты моделирования. Примем следующие значения максимальных модулей погрешностей описания калибровочных мер: 0,009 для Short и Open (0,5 градуса по аргументу); 0,003 для Load; 0,009 и 0,003 для коэффициентов передачи и отражения перемычки соответственно. Некалиброванные параметры ВАЦ: низкого уровня –14 дБ со случайным аргументом; высокого уровня со случайным аргументом и модулем от 0,9 до 1,1. Законы распределения равномерные. После калибровки и коррекции эффективные параметры имеют уровень: направленность –50 дБ; согласование портов –38 дБ (источник) и –41 дБ (приёмник); трекинг отражения 0,07 дБ; трекинг передачи 0,08 дБ. Изоляция между портами –100 дБ.

Характеристики погрешности описания мер АСМ примем равными характеристикам погрешности калибровочных мер. СКО гауссовской случайной погрешности: –80 дБ на низком уровне сигнала измерений и –74 дБ на высоком. В качестве ИУ будем моделировать устройство с различными модулями коэффициентов отражения и различными потерями в одном направлении. Аргумент параметров ИУ случаен (равномерный закон от 0 до 2π радиан). Результаты моделирования предлагаемого метода сравним с погрешностями измерений, которые могут быть получены при выполнении измерений традиционным способом на двухпортовом и четырёхпортовом VNA.

Результаты моделирования показаны на рис. 8–11. Толстыми линиями показаны результаты расчёта погрешности измерений ВАЦ в обычном режиме, тонкими линиями с отметками точек расчёта — результаты моделирования предлагаемого в работе метода. На рис. 8 показаны погрешности измерения коэффициентов отражения S_{11} и S_{22} в схеме рис. 6 при изменении уровня отражения и для двух значений модуля коэффициента передачи: 0 и –10 дБ. Точность измерений коэффициента отражения практически соответ-

ствуует точности измерений двухпортового ВАЦ, тестирующего ИУ в обычном режиме.

На рис. 9 показаны погрешности измерений коэффициента передачи от уровня передачи и для двух значений коэффициентов отражения ИУ: -5 и -20 дБ. Схема измерений — рис. 6. Точность предлагаемого метода начинает ухудшаться при потерях в ИУ более 20 дБ (в одном направлении). На рис. 10 и 11 показаны графики, аналогичные графикам рис. 8 и 9, соответственно, но для схемы измерений рис. 7. Погрешности коэффициента отражения показаны для потерь в ИУ -10 дБ и отдельно для портов ИУ, подключённых к ВАЦ, и портов ИУ, подключённых к АСМ. Погрешности измерений коэффициента отражения практически равны погрешностям измерений четырёхпортового ВАЦ, который тестирует ИУ в обычном режиме. Погрешности измерений коэффициента передачи показаны для уровня отражения ИУ -20 дБ и разделены на три категории: 1) для коэффициентов передачи между портами ИУ, которые подключены к ВАЦ; 2) для коэффициентов передачи между портами ИУ, которые подключены к АСМ; 3) для коэффициентов передачи между портами ИУ, один из которых подключён к ВАЦ, а другой — к АСМ. Самое большое увеличение погрешности в предлагаемом методе от погрешности измерений коэффициента передачи на четырёхпортовом ВАЦ характерно для коэффициентов передачи категории № 2. Наилучшая точность достигается для ИУ с потерями от 5 до 15 дБ в одном направлении. Следует отметить, что моделирование выполнено для ИУ, у которых абсолютно все коэффициенты отражения и абсолютно все коэффициенты передачи близки по уровню. Для ИУ со свойствами реальных линий передачи точность измерений выше (особенно в области низких потерь).

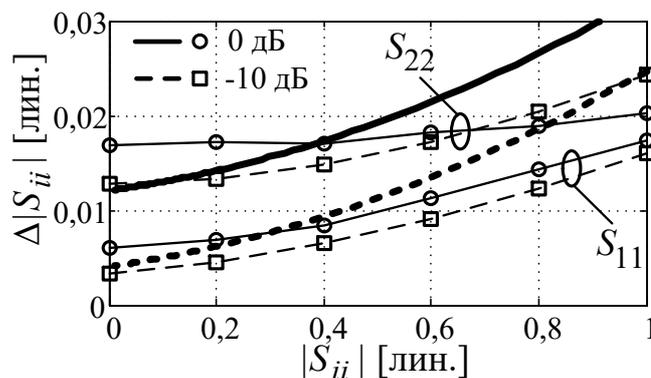


Рис. 8. Максимальные погрешности измерений коэффициентов отражения в схеме рис. 6: сплошные линии — для модуля коэффициента передачи 0 дБ; пунктирные линии — для модуля коэффициента передачи -10 дБ

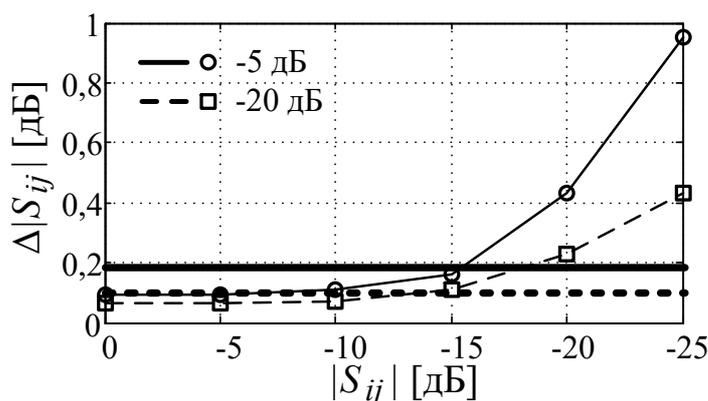


Рис. 9. Максимальные погрешности измерений коэффициента передачи в схеме рис. 6: сплошные линии — для модуля коэффициентов отражения -5 дБ; пунктирные линии — для модуля коэффициентов отражения -20 дБ

На графиках представлены погрешности измерений коэффициента отражения (слева) и коэффициента передачи (справа) при разных параметрах кабеля: вычисленные по формулам (опорные) и полученные по результатам моделирования. Опорные данные (толстые линии) были рассчитаны в соответствии с документацией ВАЦ (двухпортовом для обычных кабелей и четырехпортовом для дифференциальных).

Как показали результаты, для коэффициента отражения все данные, вычисленные по формулам и смоделированные, близки к друг другу; погрешность S_{22} в соответствии с предложенным методом хуже, чем погрешность S_{11} из-за того, что: кабель влияет на направленность ВАЦ; погрешность S_{22} зависит от погрешности всех мер АКМ, в то время как погрешность S_{11} — только от погрешности описания согласованной нагрузки АКМ.

Для коэффициента передачи в диапазоне 20 дБ все данные имеют соизмеримые значения.

Для дифференциальных кабельных сборок результаты расчёта и моделирования получились практически такими же, как в и предыдущем случае. Исключение составляет погрешность коэффициента передачи между портами АКМ. Параметры кабеля, на которые распространяется данная погрешность измерений, характеризуют зону паразитного проникновения и излучения, поэтому полученный уровень погрешности является приемлемым.

Наиболее интересна погрешность коэффициента передачи между портами ВАЦ и АСМ (прямой путь прохождения сигнала). Для этого случая в диапазоне 20 дБ вычисленные по формулам и смоделированные данные имеют соизмеримые значения.

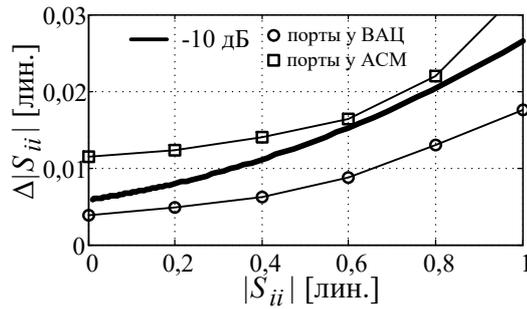


Рис. 10. Максимальные погрешности измерений коэффициента отражения в схеме рис. 7 (модули всех коэффициентов передачи –10 дБ)

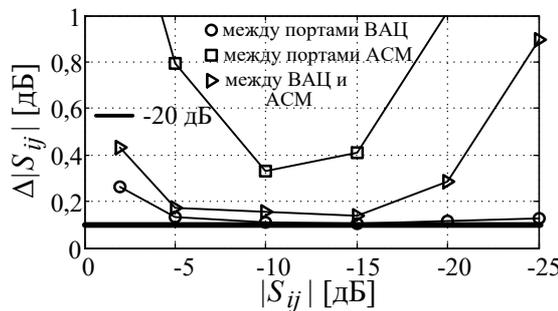


Рис. 11. Максимальные погрешности измерений коэффициента передачи в схеме рис. 7 (модули всех коэффициентов отражения –20 дБ)

Результаты экспериментальных измерений

Финальная часть статьи посвящена экспериментальным данным. Экспериментальные исследования выполнены в диапазоне частот от 10 МГц до 20 ГГц. Использованы приборы компании ООО «Планар»: ВАЦ серии Кобальт и автономный АСМ. Двухпортовое взаимное ИУ с малыми потерями (первая тестовая линия передачи) протестировано на первом порту двухпортового ВАЦ С1220. На второй порт ИУ при этом был подключён АСМ. Опорные измерения для данного ИУ получены на этом же двухпортовом VNA при подключении обоих портов ИУ к ВАЦ. На рис. 12 показаны модули разности измерений для всех 4-х параметров рассеяния методом с АСМ и традиционным способом на ВАЦ. Формулы для расчёта:

$$|\Delta S_{ii}| = |S_{ii}^{\text{ВАЦ+АСМ}} - S_{ii}^{\text{ВАЦ}}|; \quad (4)$$

$$|\Delta S_{ij}| = |S_{ij}^{\text{ВАЦ+АСМ}} - S_{ij}^{\text{ВАЦ}}|; \quad \Delta |S_{ij}| = 20 \cdot \log_{10}(1 + |\Delta S_{ij}| / |S_{ij}|), \quad (5)$$

где индекс «ВАЦ+АСМ» означает, что используется метод на основе ВАЦ с АСМ; индекс «ВАЦ» означает, что используется традиционный способ измерений. Четырёхпортовое взаимное ИУ с малыми потерями (вторая те-

стовая линия передачи) протестировано на первом и втором портах двухпортового ВАЦ С1220. На третий и четвёртый порты ИУ при этом был подключён АСМ. Опорные измерения для данного ИУ получены на четырёхпортовом ВАЦ С1420. На рис. 13 показаны модули разности измерений для 10 параметров рассеяния методом с АСМ и традиционным способом на ВАЦ. Для всех типов измерений модули разностей значений параметров рассеяния находятся на низком уровне.

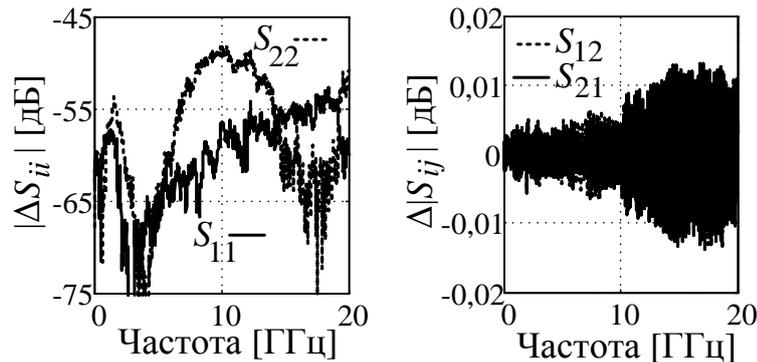


Рис. 12. Отличия измерений коэффициентов отражения (слева) и коэффициентов передачи (справа) при тестировании двухпортового ИУ разными методами

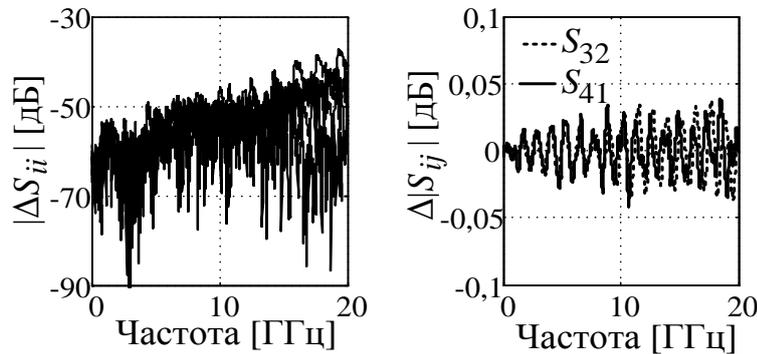


Рис. 13. Отличия измерений коэффициентов отражения (слева) и коэффициентов передачи (справа) при тестировании четырёхпортового ИУ разными методами

Сравнение результатов измерений согласно двум методам. Отличие коэффициентов отражения (слева) и коэффициентов передачи (справа):

- погрешность коэффициента отражения менее -45 дБ;
- погрешность коэффициента передачи в пределах $0,02$ дБ.

Результаты измерений для дифференциального кабеля:

- погрешность коэффициента отражения порядка $(-40 \dots -45)$ дБ;
- погрешность коэффициента передачи в пределах $0,05$ дБ.

Полученные экспериментальные данные демонстрируют высокую точность предлагаемого метода.

Заключение

Рассмотренный в работе метод измерения параметров кабельных соединений с пространственно-разнесёнными соединителями обеспечивает высокую точность измерений. Погрешность измерений соизмерима с погрешностью двухпортового (для обычных кабелей) и четырёхпортового (для дифференциальных кабелей) ВАЦ, работающих в традиционном режиме. На практике достаточно иметь рефлектометр (для обычных кабелей) или двухпортовый ВАЦ (для дифференциальных кабелей) и разработанный АСМ, что существенно снижает затраты на оборудование по сравнению с другими методами.

Представленный метод может быть использован как экономичное, но в то же самое время высокоточное решение для тестирования радиочастотных кабелей или кабелей передачи данных с потерями до 20 дБ в одном направлении. Ключевым элементом является автономный АСМ, который способен дистанционно работать без подключённых к нему кабелей питания и управления.

Исследование метрологических характеристик и подтверждение работоспособности метода выполнены посредством моделирования и экспериментально. Показано, что погрешность измерений коэффициентов отражения не превосходит –40 дБ, погрешность измерений коэффициентов передачи не превосходит –50 дБ. Использование настраиваемой матрицы весовых коэффициентов МНК позволяет формировать устойчивые оценки для ИУ с параметрами, изменяющимися в широких пределах. С ростом потерь и коэффициента отражения ИУ точность метода снижается за счёт ухудшения информативности ансамбля измерений. Используя всего два состояния АСМ (с высоким и низким уровнем отражения), можно в условиях реальных практических измерений сделать вывод о применимости метода, а также сформировать прогноз предполагаемой погрешности измерений.

Литература

1. Rytting D.K. Advances in Microwave Error Correction Techniques // Hewlett-Packard RF & Microwave Symposium, June 1987.
2. Silvonon K. LMR 16 – A Self-Calibration Procedure for a Leaky Network Analyzer // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. July 1997. V. 45. № 7. P. 1041–1049.
3. Fan W., Lu A., Wai L.L., Lok B.K. Mixed-Mode S-Parameter Characterization of Differential Structures / 2003 Electronics Packaging Technology Conf., 2003. P. 533–537.