

Современные цифровые векторные анализаторы цепей

Скалярные измерители параметров электрических и радиотехнических цепей, например АЧХ, появились уже давно, но были громоздкими и тяжелыми приборами с неудобным интерфейсом пользователя. Положение резко изменилось с разработкой цифровых векторных генераторов ВЧ и СВЧ синусоидальных сигналов с частотным цифровым синтезом, высокой стабильностью частоты и ее глубокой перестройкой. В процессе разработки цифровых анализаторов спектра и треккинг-генераторов для них появились условия для создания многофункциональных и многопортовых векторных анализаторов цепей ВЧ- и СВЧ-диапазонов — вплоть до диапазонов миллиметровых волн. Статья посвящена обзору этого класса современных приборов, разработанных и запущенных в серийное производство некоторыми крупными фирмами.

Владимир ДЬЯКОНОВ,
д. т. н., профессор
vpdyak@yandex.ru

Введение

Анализаторы цепей предназначены для оценки полного сопротивления или характеристик рассеяния активных и пассивных цепей и схем. Некоторые анализаторы цепей имеют возможность преобразования данных измерений, полученных в частотной области, во временную область и измерения типичных и применяемых в технике СВЧ параметров, в частности линейных S -параметров матрицы рассеивания. Развитие таких анализаторов означает дальнейшее внедрение в измерительную технику средств компьютерной математики [1–3].

Оценка поведения линейных электрических цепей при воздействии стимулирующих сигналов произвольной формы и связанных с множеством других цепей является фундаментальной проблемой в процессах синтеза и испытания цепей. Векторные анализаторы спектра и цепей решают эти проблемы наиболее комплексно, давая полное описание поведения линейной цепи в частотной области. Кроме того, некоторые анализаторы цепей имеют возможность преобразования данных измерений, полученных в частотной области, во временную область, тем самым они позволяют получить еще более глубокое представление о поведении линейных цепей.



Рис. 1. Двухпортовый радиочастотный и микроволновый векторный анализатор и мультиметр цепей серии MS4640 фирмы Anritsu с частотами от 70 кГц до 60/110/500 ГГц

Анализаторы цепей получили массовое развитие в процессе создания и совершенствования цифровых осциллографов и скалярных анализаторов спектра с треккинг-генератором [4]. Их можно рассматривать как новый виток в развитии электро- и радиоизмерительных приборов.

На комплексной плоскости синусоидальное напряжение с произвольной фазой представляется вектором. Поэтому анализаторы спектра и цепей, работающие с комплексными сигналами и обеспечивающие построение не только амплитудно-частотных, но и фазо-частотных характеристик цепей, называют векторными. Другие виды анализаторов, например скалярные анализаторы и анализаторы логических цепей, в этой статье не рассматриваются.

Анализаторы цепей фирмы Anritsu

Японская компания Anritsu (www.anritsu.com) является известным «законодателем мод» на рынке векторных анализаторов цепей и одним из лидеров в их производстве. Она выпускает обширную номенклатуру многофункциональных векторных анализаторов цепей в диапазоне частот до 500 ГГц. Например, типичным представителем таких изделий является векторный анализатор цепей серии MS4640 (рис. 1) [5].

На рис. 2 показана упрощенная функциональная схема двухпортового анализатора цепей. Она содержит источник (генератор) перестраиваемого по частоте сигнала и две пары приемников (опорных и измерительных). Выходы генераторов и входы приемников подключены к широкополосным портам анализатора, а между ними подключается исследуемое или тестируемое устройство DUT. Процесс снятия характеристик DUT вполне понятен и очевиден. Установка частотного диапазона осуществляется как в анализаторах спектра с помощью цифровых кнопок и (при имитации плавного изменения частоты) поворотной ручкой. Она же используется для выбора позиций меню и установки курсоров.

Пример исследования четырехполюсника с имеющими заземление входом и выходом (полосового фильтра) показан на рис. 3. При этом достаточно иметь два порта с коаксиальными разъемами.

Анализатор цепей может отображать на своем экране множество различных графиков зависимости, например частотной зависимости активной и реактивной составляющих входного и выходного импеданса, АЧХ и ФЧХ различных цепей и устройств, частотной зависимости S -параметров, круговые диаграммы и т. д. (рис. 4). Они позволяют су-

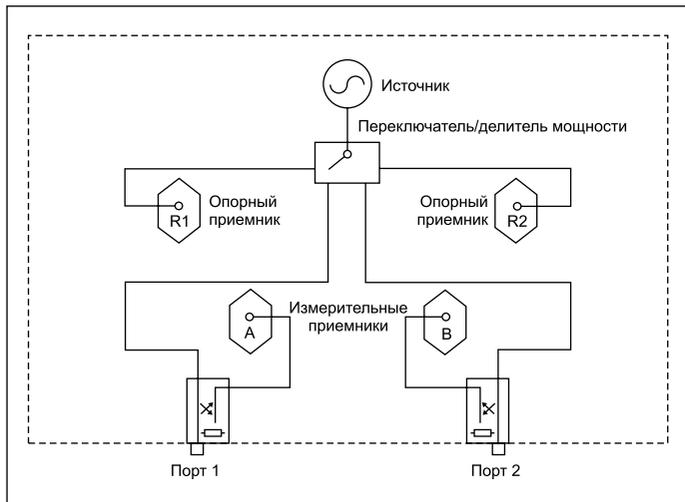


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема двухпортового анализатора цепей

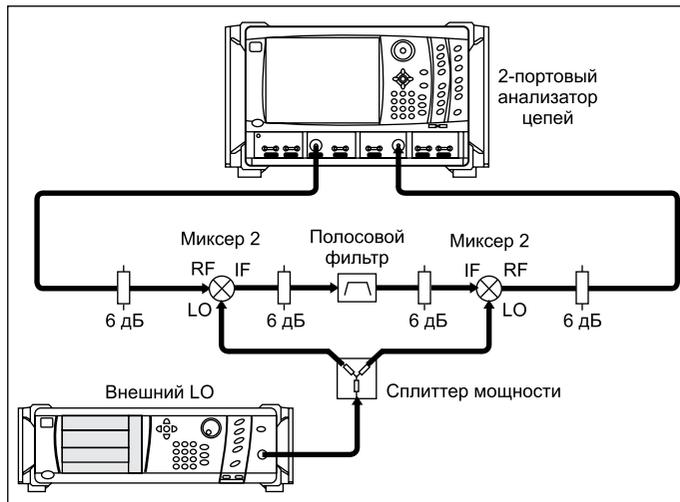


Рис. 3. Исследование полосового фильтра двухпортовым анализатором цепей

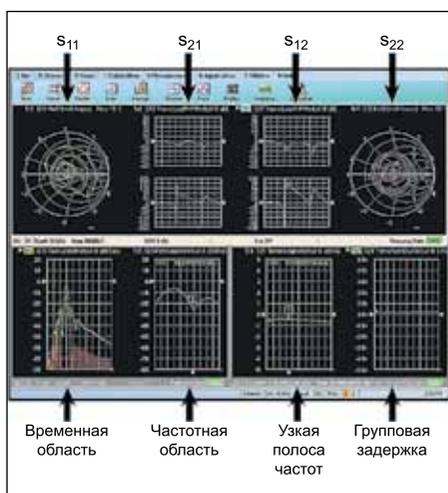


Рис. 4. Типичный экран анализатора цепей

В ВЧ- и СВЧ-диапазоне часто используются многопортовые устройства — многополюсники, имеющие два и более входных и выходных порта с высококачественными коаксиальными разъемами. На первых порах для их построения применялись различные расширители портов. На рис. 5 показано применение такого расширителя для преобразования двухпортового анализатора цепей в четырехпортовую измерительную систему.

На рис. 6 приведена упрощенная схема четырехпортовой измерительной системы, полученной таким способом. Система позволяет исследовать и тестировать многопортовые устройства (четыре порта) или одновре-



Рис. 7. Рабочее место с четырехпортовой измерительной системой

дительно о работе исследуемых цепей и устройств в широком диапазоне частот. Круговые диаграммы используются для тонкой оценки поведения устройств и систем, в частности для определения областей их устойчивости.



Рис. 5. Преобразование двухпортового анализатора цепей в четырехпортовую измерительную систему анализа цепей

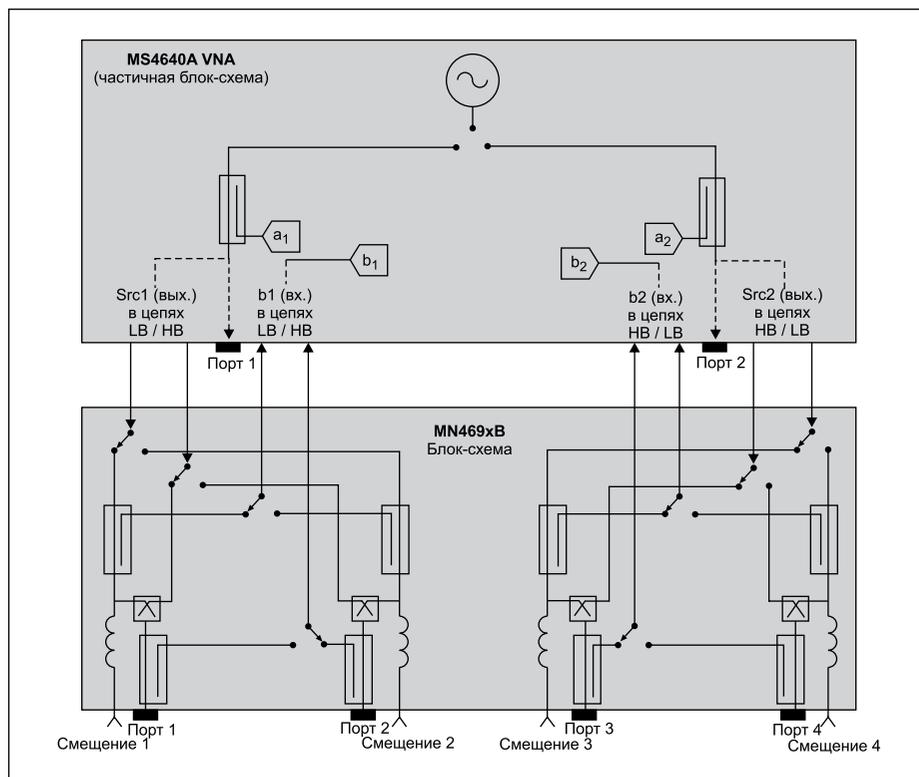


Рис. 6. Упрощенная схема четырехпортовой измерительной системы

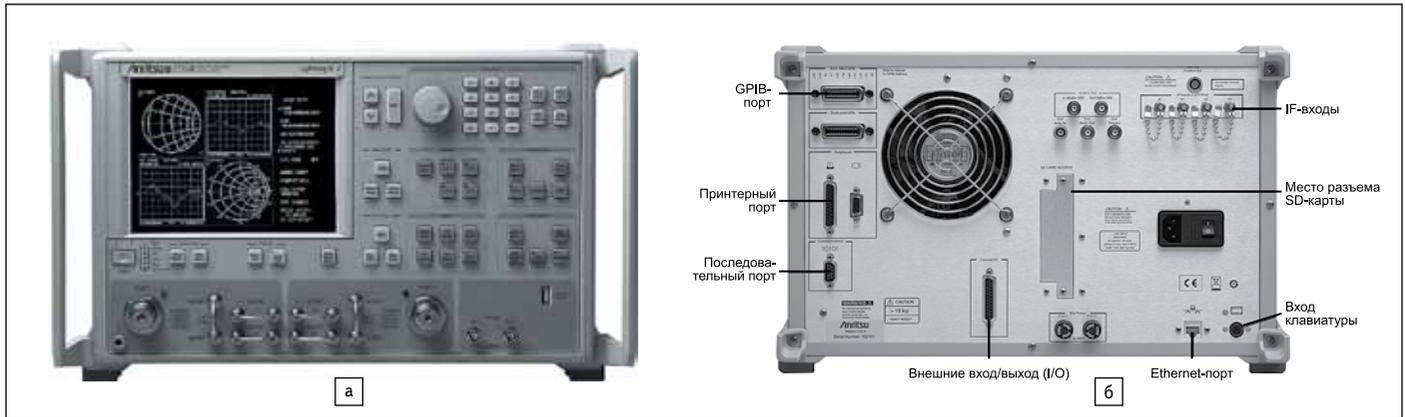


Рис. 8. Анализатор цепей 37269B: а) вид спереди; б) вид сзади

менно два двухпортовых устройства, например с целью сравнения их характеристик.

На рис. 7 показано типичное рабочее место, оснащенное четырехпортовой измерительной системой. На рабочем столе анализатор цепей заменяет сразу несколько сложных измерительных приборов: генератор качающейся частоты, анализатор спектра, осциллограф и цифровой вольтметр/частотомер.

В дальнейшем были созданы модели анализаторов цепей со многими портами и одним корпусом. Так, многопортовый анализатор цепей Anritsu 37369A имеет частотный диапазон от 40 МГц до 40 ГГц. Динамический диапазон приемной части — 120 дБ на частоте 20 ГГц (порог шумов –90 дБм, наибольший уровень входного сигнала — +30 дБм) и 113 дБ на частоте 40 ГГц (порог шумов –83 дБм, входной сигнал — +30 дБм). Динамический диапазон системы на частоте 20 ГГц составляет 90 дБ (порог шумов –90 дБм плюс наибольшая мощность на выходе измерительного порта 0 дБм). На частоте 40 ГГц динамика системы составляет 76 дБ (уровень собственных шумов приемника: –83 дБм, наибольшая мощность генератора: –7 дБм). Равномерность АЧХ на частоте 20 ГГц — не хуже ± 2 дБ, на частоте 40 ГГц — не хуже ± 3 дБ. Поддерживаются следующие типы графической зависимости: логарифмическая величина, фаза, логарифмическая величина совместно с фазой, диаграмма Вольперта-Смита, линейный и логарифмический полярные режимы, групповое время задержки, линейная величина, линейная величина совместно с фазой, мощность.

В анализаторе применены высококачественные коаксиальные разъемы 2,92 мм либо разъемы типа К. (Они позволяют добиваться направленности в 38 дБ, согласования с источником в 38 дБ, согласования с нагрузкой в 38 дБ, равномерности характеристики передачи $\pm 0,08$ дБ, равномерности характеристики отражения $\pm 0,006$ дБ и изоляции больше 100 дБ.)

Анализатор цепей 37269B фирмы Anritsu предназначен для СВЧ-диапазона от 40 МГц до 40 ГГц. В нем работает подавляющее большинство средств радиосвязи (в том числе массовой сотовой, мобильной и спутниковой), а также телевидения и радиолокации.

В анализаторе есть встроенный генератор с цифровым синтезатором частоты и быстрым ее изменением (качением). Разрешение по частоте — 1 Гц. Прибор имеет высокостабильный опорный источник, четыре независимых канала приема и четыре независимых вида отображения данных с шестью независимыми маркерами. Есть также встроенный жесткий диск и флорпи-дискет. Обеспечивается измерение во временной области. Вид анализатора спереди показан на рис. 8а.

В аналоговых генераторах синусоидальных сигналов высокую стабильность частоты и широкий диапазон ее перестройки одновременно обеспечить невозможно. По мере увеличения диапазона перестройки по частоте стабильность частоты быстро падает, и режим качания частоты становится бессмысленным. Это противоречие удалось преодолеть только у генераторов с цифровым синтезатором частоты. При этом для изменения частоты в широких пределах

не требуются конденсаторы переменной емкости и катушки индуктивности с переменной индуктивностью — вариометры. Конечно, цифровой синтез намного сложнее аналоговых способов генерации синусоидальных колебаний, но он реализуется на современном микроэлектронном уровне в виде микросхем частотных синтезаторов. К настоящему времени они хорошо апробированы в массовом серийном производстве и дешевы.

С задней стороны анализатора (рис. 8б) расположены основные порты для связи с компьютером и другими приборами (GPIB, параллельный принтерный порт, последовательный коммуникационный порт RS-232, сетевой Ethernet-порт) и различные вспомогательные порты ввода/вывода (I/O).

Прибор предназначен для полного исследования линейных четырехпортовых устройств, так как позволяет измерять все главные характеристики матрицы рассеяния (их четыре): S_{21} , S_{11} , S_{12} и S_{22} (рис. 9).

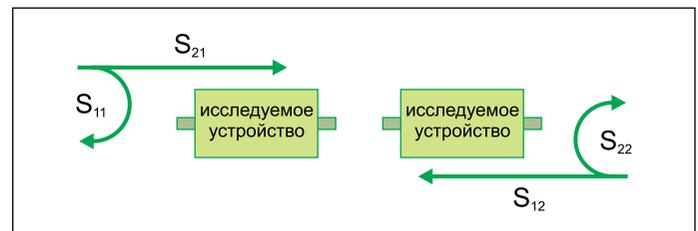


Рис. 9. Главные S-параметры матрицы рассеивания

От приборов с индексом А фирмы Anritsu этот анализатор отличается параметрами нижнего порога шумов приемника и показаниями мощности на выходе генератора и входе приемника. Динамический диапазон приемной части составляет 98 дБ на частоте 20 ГГц (порог шумов –95 дБм, наибольший уровень входного сигнала — +3 дБм); на частоте 40 ГГц, соответственно, — 96 дБ (наибольший уровень входного сигнала — +3 дБм, порог шумов — –93 дБм). Динамический диапазон системы на частоте 20 ГГц составляет 90 дБ (порог шумов –95 дБм плюс максимальная мощность на выходе порта –5 дБм), а на частоте 40 ГГц динамика равна 78 дБ (порог шумов –93 дБм, выход генератора –15 дБм). Как видно, динамика этого анализатора уступает соответствующим параметрам моделей 37xxxА. Равномерность АЧХ на частоте 20 ГГц не хуже ± 2 дБ, а на частоте 40 ГГц — не хуже ± 3 дБ.

Прибор поддерживает следующие виды измерительной и графической зависимости: логарифмическая величина, фаза, логарифмическая величина совместно с фазой, диаграмма Вольперта-Смита (полное сопротивление и полная проводимость), линейный и логарифмический полярные режимы, групповое время задержки, линейная величина, линейная величина совместно с фазой, мощность. Управление другими приборами осуществляется через интерфейс GPIB. Калибровка проводится методами LRL и LRM.

Анализатор цепей Anritsu 37347C имеет частотный диапазон от 40 МГц до 20 ГГц. В нем применен источник быстрого качания частоты высокой стабильности с цифровым синтезом сигнала и разрешением по частоте 1 Гц. Есть четыре независимых канала приема и четыре независимых вида отображения данных. В этом приборе для записи и хранения данных есть встроенный жесткий диск и флоппи-диск. (В последнее время он заменяется USB-модулями флэш-памяти.) Предусмотрено измерение во временной области, можно задать до шести маркеров.

Эта модель обеспечивает полное исследование четырехполюсников и позволяет измерять все главные характеристики матрицы рассеяния: S_{21} , S_{11} , S_{12} и S_{22} . Динамический диапазон приемной части — 121 дБ на частоте 20 ГГц (порог шумов -91 дБм, наибольший уровень входного сигнала — +30 дБм). Динамический диапазон системы на частоте 20 ГГц составляет 96 дБ (порог шумов -91 дБм плюс наибольшая мощность на выходе измерительного порта +5 дБм). Равномерность АЧХ на частоте 20 ГГц — не хуже ± 2 дБ.

Анализатор цепей Anritsu 37369C предназначен для панорамного векторного исследования пассивных и активных четырехполюсников в частотном диапазоне от 40 МГц до 40 ГГц. Прибор имеет встроенный генератор с быстрой перестройкой частоты и высокой стабильностью, четыре независимых приемных квадратурных канала, измерительный блок с двумя мостами высокой направленности, встроенные аттенюаторы 70 дБ для регулировки ослабления зондирующего сигнала и цепи смещения по постоянному току для питания активных устройств через центральную жилу измерительного порта.

Приведем характеристики источника зондирующего сигнала:

- минимальное разрешение по частоте: 1 кГц (1 Гц с опцией 10A);
- стабильность: 10^{-6} /день (10^{-9} /день с опцией 10A);
- диапазон регулировки мощности: от +5 дБм до -95 дБм;
- разрешение по амплитуде: 0,05 дБ;
- точность установки уровня: +0,5 дБ на частоте 2 ГГц;
- неравномерность АЧХ: +2 дБ до 20 ГГц, +3 дБ до 40 ГГц;
- уровень гармоник: -15 дБн;
- уровень фазовых шумов: -60 дБн (20-кГц отстройка от 20 ГГц).

Характеристики приемной части:

- четыре независимых приемных канала (два опорных, два измерительных);
- уровень шумов (полоса анализа 10 Гц): не выше -90 дБм до 20 ГГц, не выше -83 дБм до 40 ГГц;
- максимальный уровень входного сигнала: +30 дБм;
- максимальный динамический диапазон при прямом доступе к приемнику: 120 дБ до 20 ГГц, 113 дБ до 40 ГГц;
- максимальная дисперсия шумовой дорожки (полоса ПЧ 1 кГц): не превышает 0,08 дБ по модулю и 1° по фазе.

Время измерения (полоса ПЧ 10 кГц, полная 12-параметрическая калибровка, полоса измерения от 40 МГц до 40 ГГц): 500 мс для 101 точки, 1,3 с для 401 точки, 4,5 с для 1601 точки.

Поддерживаются следующие методы калибровки: полная 12-параметрическая калибровка SOLT для коаксиального тракта, калибровка для волноводов с двумя короткозамкнутыми нагрузками (offset-short), 16-параметрическая калибровка LRL и LRM для микрополоскового тракта и измерений на пластине (также может применяться и в коаксиале) и более легкие типы калибровки: нормализация на короткозамкнутое, холостое входное и сквозное соединение.

После калибровки ошибка измерения фазы для S_{21}/S_{12} не превышает 3° в диапазоне частот до 20 ГГц при величине S_{21}/S_{12} от +10 до -60 дБ. (Во всем диапазоне частот — не более 11°). Типичное значение ошибки измерения фазы при величине S_{21}/S_{12} от 0 до -30 дБ составляет от $0,8^\circ$ до 1° . Ошибка измерения амплитуды для S_{21}/S_{12} не превышает 0,4 дБ в диапазоне частот до 20 ГГц при значениях S_{21}/S_{12} от +10 до -60 дБ (не более 1,5 дБ во всем диапазоне частот). Типичное значение ошибки измерения амплитуды S_{21}/S_{12} во всем диапазоне частот при S_{21}/S_{12} от 0 до -30 дБ не превышает 0,2 дБ. Ошибка измерения фазы для S_{11}/S_{22} не превышает 5° в диапазоне частот до 20 ГГц при величине S_{11}/S_{22} от 0 до -20 дБ. (Во всем

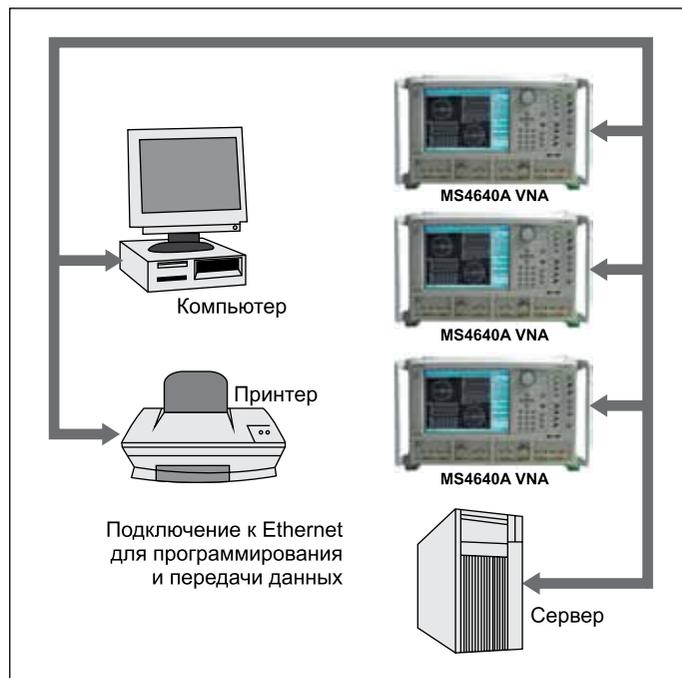


Рис. 10. Пример построения компьютеризированной системы на базе нескольких анализаторов цепей

диапазоне частот — не более 9°). Ошибка измерения амплитуды для S_{11}/S_{22} не превышает 0,9 дБ в диапазоне частот до 20 ГГц при значениях S_{11}/S_{22} от 0 до -20 дБ (не более 1,4 дБ во всем диапазоне частот).

Функциональные возможности анализатора: четыре независимых окна отображения данных, шесть независимых маркеров. Поддерживаются все стандартные виды графической зависимости и форматы представления данных. Стандартно реализована возможность измерения частотно-преобразующих устройств. Прибор имеет ныне устаревший флоппи-диск и жесткий диск. Опция 2A добавляет возможность анализа во временной области при помощи обратного преобразования Фурье. Анализ во временной области позволяет определять неоднородности в тракте, характер неоднородности (емкостный, индуктивный, резистивный), а также упростить настройку многозвенных фильтров и осуществлять фильтрацию во времени для исключения переотражений.

Если возможностей конкретной модели анализатора цепей недостаточно, можно построить компьютеризированную систему на основе нескольких приборов (рис. 10). Состав таких систем зависит от их конкретного назначения и типа решаемых задач.

Значительные трудности вызывает калибровка анализаторов цепей, поскольку у них погрешность измерения намного меньше, чем у обычных калибраторов осциллографов и анализаторов спектра. Поэтому для калибровки поставляются специальные откалиброванные цепи (блоки) в специальных корпусах (рис. 11).

Блок калибровки подключается непосредственно к портам анализатора цепей (рис. 12). При этом отсутствуют искажения, вносимые соединительными кабелями и волноводами, и минимизируются искажения, вносимые ВЧ- и СВЧ-разъемами. Градуировочные характеристики калибровочных блоков указываются в их техническом описании и паспорте на изделие.

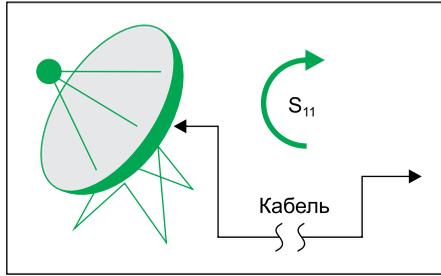
Необходимость в анализаторах цепей часто возникает в производственных и полевых условиях, например при анализе и тестировании антенных систем. В этом случае применение громоздких и тяжелых лабораторных анализаторов цепей затруднено, а иногда и просто невозможно — например, по причине отсутствия автономного питания в дальней зоне антенной системы. Поэтому были созданы портативные анализаторы цепей с питанием как от сети, так и от аккумуляторной батареи (рис. 13). Использование новейшей микроэлектронной



Рис. 11. Блок калибровки анализатора цепей

базы позволило создать анализаторы не только с малыми габаритами и весом, но и с автономным питанием и высокими техническими характеристиками. Примером могут служить анализаторы цепей типа MS2026 и MS2028 компании Anritsu с частотным диапазоном от 5 кГц до 6 и 20 ГГц.

Портативные анализаторы нередко применяются для контроля параметров и тестирования антенных устройств и систем в полевых и производственных условиях (рис. 14). С их помощью можно снять характеристики антенн в ближней и дальней зонах. Заметим,

Рис. 14. Подключение портативного анализатора цепей к антенне для контроля ее параметра S_{11}

что при измерениях в дальней зоне прибор нужно перемещать относительно антенны на большое расстояние, что возможно только при умеренных габаритах прибора и его автономном питании.

Экран дисплея даже портативного анализатора позволяет отображать большой объем данных, например в четырех различных окнах (рис. 15а) или в одном большом окне (рис. 15б).

Анализаторы цепей компании Agilent Technologies

Американская компания Agilent Technologies (www.agilent.com) — крупнейший производитель цифровых прибо-

ров, известных во всем мире. В разработке анализаторов цепей она достойно приняла эстафету от фирмы Hewlett Packard, прославившейся созданием огромного числа измерительных приборов, в том числе и доживших до наших дней анализаторов цепей. Они до сих пор продаются на нашем рынке.

Ныне Agilent предлагает широкий выбор моделей векторных анализаторов цепей, отличающихся по цене и потребительским свойствам (рис. 16). Они перекрывают в совокупности огромный диапазон частот от 5 Гц до 1,05 ТГц [6] и устанавливают новые стандарты на эти приборы. Анализаторы позволяют проводить измерения S-параметров, вносимых потерь, коэффициента усиления, обратных потерь, параметров балансных/небалансных устройств, точки компрессии, искажений, коэффициента шума и дифференциальные измерения. Многие анализаторы могут выполнять измерения в импульсном режиме и даже определять X-параметры нелинейных устройств.

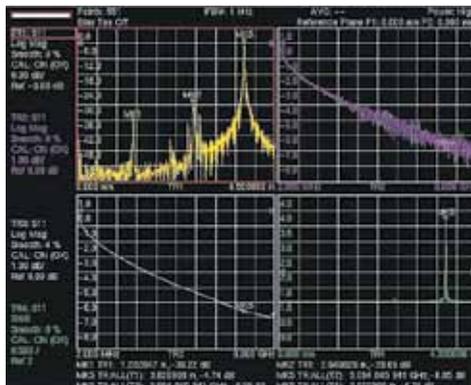
Анализатор цепей радиочастотного диапазона E5100 (рис. 17) оптимален для относительно низкочастотных измерений в полосе частот до 300 МГц. Он имеет малую низкочастотную границу (10 кГц), то есть анализируемая им область частот захватывает даже звуковые частоты. Это открывает перед анализатором возможности исследования и те-



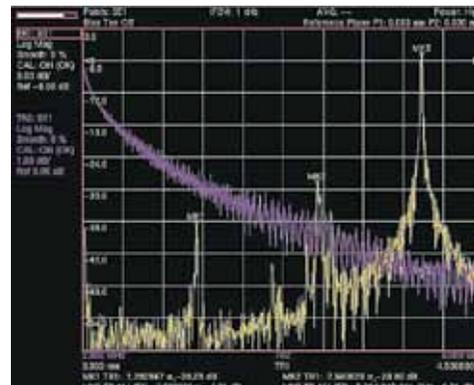
Рис. 12. Подключение блока калибровки к анализатору цепей



Рис. 13. Портативный анализатор цепей фирмы Anritsu



а



б

Рис. 15. Экран портативного анализатора цепей: а) при контроле параметра S_{11} антенны в четырех окнах; б) просмотр в одном окне анализатора цепей

| | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|---------|-------|--------|-------|--------|---------|
| Серия E5100 (от 10 кГц до 300 МГц) | [График частотного диапазона] | | | | | | |
| Серия комбинированных анализаторов (от 10 ГГц до 1,8 ГГц) | [График частотного диапазона] | | | | | | |
| Серия ENA-L (от 300 кГц до 3 ГГц) | [График частотного диапазона] | | | | | | |
| Серия ENA (от 9 кГц до 8,5 ГГц) | [График частотного диапазона] | | | | | | |
| Серия PNA-L (от 300 кГц до 50 ГГц) | [График частотного диапазона] | | | | | | |
| Серия PNA-X (от 10 МГц до 26,5 ГГц) | [График частотного диапазона] | | | | | | |
| Серия PNA (СВЧ) (от 10 МГц до 67 ГГц) | [График частотного диапазона] | | | | | | |
| Серия PNA миллиметрового диапазона (от 10 МГц до 110 ГГц) | [График частотного диапазона] | | | | | | |
| Серия 8757 (от 10 МГц до 110 ГГц) | [График частотного диапазона] | | | | | | |
| Перекрытие частот анализаторами цепей компании Agilent | 10 кГц | 100 кГц | 1 МГц | 10 МГц | 1 ГГц | 10 ГГц | 100 ГГц |

Рис. 16. Типы анализаторов цепей компании Agilent и диапазоны их частот



Рис. 19. Экран с результатами измерения S-параметров

фонов iPhone и планшетных компьютеров iPad компании Apple.

Несмотря на малые габариты и вес (2,8 кг) портативных анализаторов цепей FieldFox, это вполне полноценные приборы с обширными функциональными возможностями и высокими техническими характеристиками. Они позволяют выполнять измерения S-параметров и строить относящиеся к ним графические диаграммы различного типа (рис. 19). Выпускается несколько моделей анализаторов — от N9912A с диапазоном частот 3 и 7 ГГц до N8835/6/7/8A с диапазоном частот до 26,5 ГГц.

Серия настольных векторных анализаторов цепей ENA имеет диапазон частот от 300 кГц до 20 ГГц. Внешний вид анализатора (рис. 20) — вполне традиционный для стационарных приборов этого класса. Принцип действия этих анализаторов основан на возможности раздельного измерения параметров падающей и отраженной волны сигнала с применением направленных ответвителей. В своем составе анализаторы содержат генератор качающейся частоты (ГКЧ) с частотным синтезатором, двухканальный приемник с двумя опорными смесителями и блок измерений S-параметров. ГКЧ формирует высокостабильный по амплитуде сигнал в заданном диапазоне частот.

Эта серия приборов оптимальна для измерений S-параметров или построения рефлектометра с блоком передачи/отражения (T/R). Экран прибора имеет высокое разрешение и позволяет строить различные диаграммы (рис. 21а).

стирования огромного числа электронных и радиотехнических устройств: резонансных цепей и контуров, кварцевых и пьезоэлектрических резонаторов и фильтров, обычных RC-RCL цепей, электромеханических фильтров, преселекторов и усилителей ПЧ радиоприемных устройств, линейных интегральных микросхем, включая операционные усилители, и т. д. В этой области частот анализатор цепей успешно заменяет построители АЧХ и ФЧХ и анализаторы спектра (обычные и с треккинг-генератором) — как правило, скалярные.

Портативные анализаторы цепей FieldFox (рис. 18) объединяют в себе функциональность векторного анализатора цепей, анализатора спектра, анализатора кабелей и антенн, измерителя мощности и векторного вольтметра. Функции анализатора цепей сосредоточены в диапазоне частот от 2 МГц до 4–26,5 ГГц. Встроенная система калибровки QuickCal выполняет автоматическую калибровку прибора при его включении без помощи калибровочного набора. В новейших анализаторах этого типа предусмотрено дистанционное управление от смарт-



Рис. 18. Портативный анализатор цепей FieldFox N9923A: а) вид спереди; б) вид с торца



Рис. 17. Анализатор радиочастотных цепей E5100

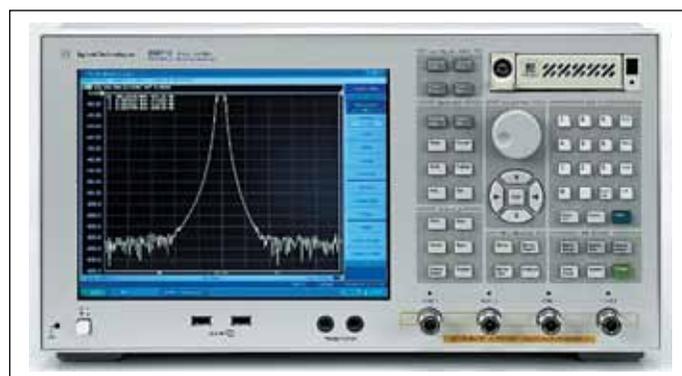


Рис. 20. Векторный анализатор E5071C серии ENA компании Agilent Technologies

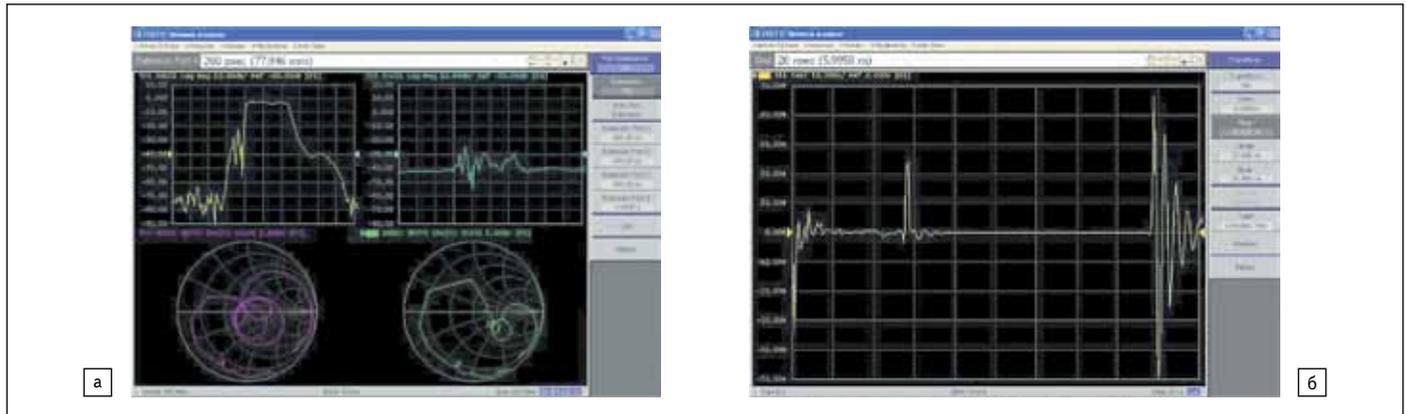


Рис. 21. Вид экрана анализатора цепей E5071C при отображении: а) различных диаграмм; б) сигналов во временной области (режим рефлектометра)

В режиме рефлектометра анализатор E5071C выполняет функции качественного высокоскоростного цифрового осциллографа. Он позволяет строить осциллограмму исходного и отраженного от неоднородности и конца кабеля импульсов (рис. 21б), измерять временную задержку между ними и расстояние до неоднородности, а также анализировать ее тип и определять общую длину кабеля.

Серия PNA-L является экономным решением типовых измерительных задач по анализу цепей в полосе частот от 300 кГц до 50 ГГц, рассчитанным на ограниченный (но не малый!) бюджет.

Серия ENA-LF — одно из последних пополнений семейства анализаторов ENA-L. В нем расширен диапазон частот вниз до 5 Гц. Возможны 2-портовые базовые измерения S-параметров со встроенным источником напряжения смещения.

Серия ENA — это усовершенствованная архитектура для полного 2- или 4-портового комплекса измерения S-параметров в полосе частот от 9 кГц до 20 ГГц с поддержкой до 36 измерительных каналов.

Высокопроизводительные настольные приборы серии PNA устанавливают новые стандарты по скорости, точности и универсальности применения в полосе частот до 67 ГГц (с возможностью расширения до 1 ТГц). Особенностью приборов этой серии является возможность изменения

конфигурации измерительного блока, обеспечивающей доступ к внутренним цепям распространения сигналов с целью повышения чувствительности, достижения более широкого динамического диапазона и возможности добавления принадлежностей для решения сложных измерительных задач.

В серию PNA входят высокопроизводительные приборы для измерения параметров прецизионных устройств СВЧ-диапазона. Они позволяют проводить тестирование параметров линейных и нелинейных устройств с помощью одного инструмента с одним подключением, поддерживают измерения X-параметров нелинейных устройств и могут работать в импульсном режиме измерений. Эти, весьма многочисленные многофункциональные анализаторы цепей заслуживают специального рассмотрения в отдельной статье.

Анализаторы цепей компании Rohde & Schwarz

Европейская компания Rohde & Schwarz (www.rohde-schwarz.ru) широко известна во всем мире. Она разработала и выпускает большое семейство комбинированных, универсальных и высокопроизводительных приборов, перекрывающих диапазон частот до 110 и даже 500 ГГц, сбалансированных по скорости, динамическому диапазону, гибкости и точности, с удобным графическим

интерфейсом и различными методами калибровки. Это делает их незаменимыми инструментами для выполнения различных измерений в условиях лабораторий и на производстве для решения настоящих и будущих измерительных задач. Большинство приборов внесено в Государственный реестр средств измерений РФ: их можно применять в сфере действия государственного метрологического контроля, а также полагаться в любых аккредитованных метрологических службах.

Уникальная серия переносных компактных приборов ZVL (рис. 22) объединяет в себе функции анализатора цепей, анализатора спектра и измерителя мощности, с диапазоном частот от 9 кГц до 3–6 или даже 13,6 ГГц. Эти модели могут работать от 12-В источника постоянного тока или от аккумулятора. Благодаря этому анализаторы можно использовать в полевых условиях. Они являются альтернативой для рассмотренных выше портативных ручных анализаторов цепей.

Анализаторы цепей серий ZNB и ZNC отличаются простотой работы и большим сенсорным экраном. Приборы обеспечивают исключительное удобство при конфигурировании измерений и анализе результатов. Векторные анализаторы ZNB имеют четыре порта с частотами от 9 кГц до 4,5 или 8,5 ГГц (рис. 23): это наиболее мощные приборы из этих серий. А ZNC с диапазоном частот от 9 кГц до 3 ГГц — экономичная альтернатива для пользователей, не предъявляющих



Рис. 22. Компактный анализатор цепей серии ZVL фирмы Rohde & Schwarz



Рис. 23. Векторный анализатор цепей серии ZNB фирмы Rohde & Schwarz



Рис. 24. Анализатор цепей серии ZVB фирмы Rohde & Schwarz

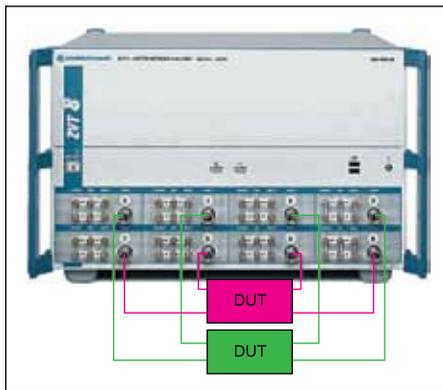


Рис. 25. Пример подключения двух четырехполюсников к портам анализатора ZVT



Рис. 27. Преобразователи миллиметровых волн фирмы Rohde & Schwarz

высоких требований к динамическому диапазону и набору функциональных возможностей прибора.

Приборы серии ZVB (рис. 24) перекрывают диапазоны частот от 10 МГц до 14 или 20 ГГц. Они построены на основе новейших аппаратных и программных концепций и имеют исчерпывающий набор измерительных функций, превосходные рабочие характеристики, высокое быстродействие и скорость передачи данных. В этих анализаторах есть четыре или два измерительных порта.

Модели ZVT — первые в мире многопортовые векторные анализаторы цепей, содержащие до восьми (для диапазона 8 ГГц) или до шести (для диапазона 20 ГГц) измерительных портов в одном приборе. За счет

отсутствия дисплея и клавиатуры конструкция анализаторов упрощена (рис. 25), и они в первую очередь предназначены для использования в системах с дистанционным управлением по шине IEC/IEEE или по локальной сети.

Анализаторы высшего класса серии ZVA (рис. 26) — незаменимый инструмент для выполнения самых сложных измерений в ВЧ- и СВЧ-областях. Выдающиеся характеристики, расширенные возможности калибровки, удобный интерфейс и чрезвычайно высокая гибкость — все это позволяет проводить одновременно целый комплекс из-

мерений при одном подключении в частотных диапазонах до 8, 24, 40, 50, 67, 80 или 110 ГГц.

Измерения на миллиметровых волнах в диапазонах V, E, W, F, D, G, J и Y в диапазоне от 50 до 500 ГГц выполняются с помощью специальных конвертеров. Преобразователи частоты (конвертеры) Rohde & Schwarz обеспечивают проведение анализа электрических цепей в этом диапазоне частот с использованием анализатора цепей — ZVA24, ZVA40, ZVA50, ZVA67 или ZVT20 (рис. 27). Отличаясь высоким динамическим диапазоном, эти преобразователи устанавливают новые стандарты на СВЧ измерительную аппаратуру. Они легко монтируются, очень удобны в работе и обеспечивают быстрое проведение измерений.



Рис. 26. Анализатор цепей серии ZVA

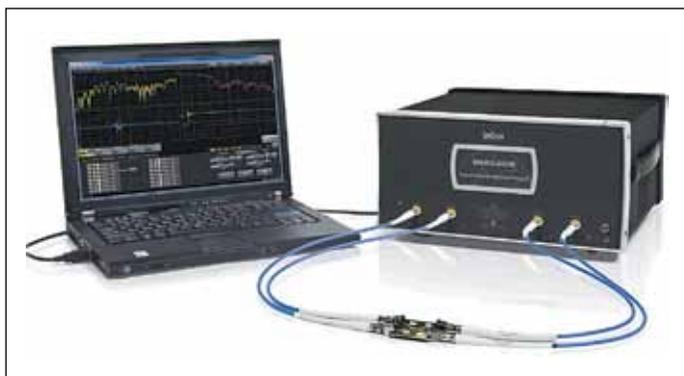


Рис. 28. SPARQ — блок-приставка анализатора цепей фирмы LeCroy

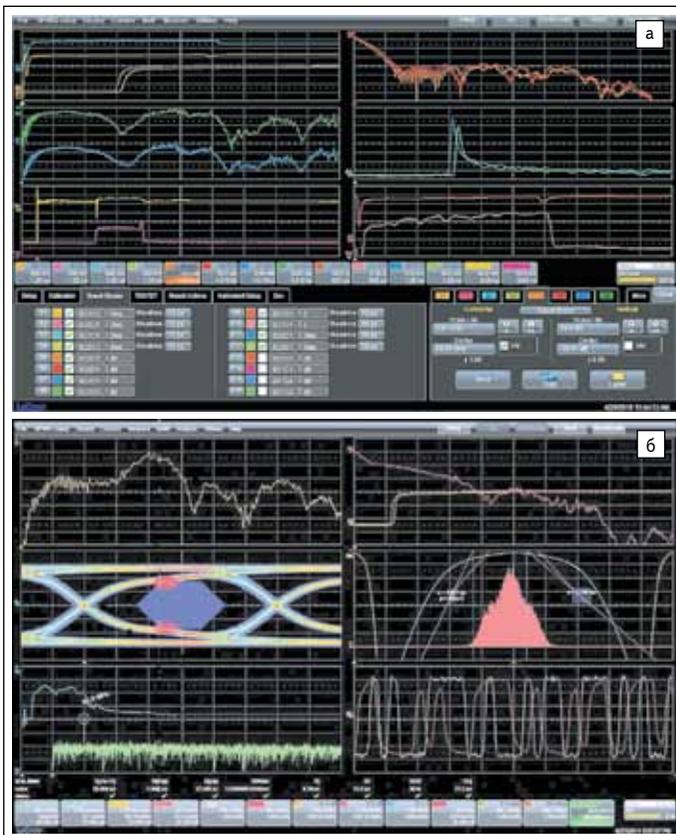


Рис. 29. Экран компьютера:
а) с подключенным к нему блоком анализатора цепей SPARQ;
б) с блоком SPARQ с построенными специальными диаграммами

Блок анализатора цепей фирмы LeCroy

Известная благодаря выпуску высококлассных осциллографов фирма LeCroy до сих пор не включилась в гонку разработки и производства анализаторов цепей. Она выпустила блок-приставку к персональному компьютеру SPARQ (рис. 28) [7].

Экран компьютера при применении блока SPARQ представлен на рис. 29а. На нем видно, что блок обеспечивает достаточную для анализаторов цепей функциональность и отображение основных характеристик цепей.

Примеры построения специальных диаграмм (в том числе «глазковой» и гистограммы джиттера) показаны на рис. 29б.

На рис. 28 и 29 видно, что создателем прибора SPARQ является компания, специализирующаяся на разработке осциллографов. Это ясно по виду интерфейса пользователя и обширным возможностям в построении графиков временной зависимости.

Заключение

В настоящее время векторные многопортовые анализаторы цепей развились в отдельное направление многофункциональных измерительных приборов, охватывающих все диапазоны частот и длин волн — от звуковых до миллиметровых [3–7]. Приборы наглядно демонстрируют внедрение средств компьютерной математики и позволяют строить различные характеристики и диаграммы, отражающие работу практически любых электро- и радиотехнических устройств

и систем — как электронных, так и электромеханических и пьезоэлектрических [8, 9]. Эти приборы становятся незаменимыми при исследовании и тестировании различных компонентов, устройств и систем, подчас заменяя обычные генераторы испытательных сигналов, осциллографы и анализаторы спектра. ■

Литература

1. Дьяконов В. П. Компьютерная математика в измерительной технике // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2009. № 5–6.
2. Дьяконов В. П. Проектирование и моделирование СВЧ-устройств в MATLAB R2010 // Компоненты и технологии. 2011. № 6.
3. Дьяконов В. П. Сверхскоростная твердотельная электроника. М.: ДМК-Пресс, 2013.
4. Дьяконов В. П. Все о трекинг-генераторах анализаторов спектра и их применении // Компоненты и технологии. 2011. № 3.
5. MS4640A Series 70 kHz to 70/110/500 GHz and beyond. Family of RF to Microwave and Multimetric-wave Vector Network Analyzers. Product Brochure Vector Star, 2009.
6. Анализаторы цепей. Руководство по выбору. Agilent Technologies. Август 2013.
7. Дедюхин А. Анализаторы цепей SPARQ // Компоненты и технологии. 2010. № 12.
8. Дамор Дж. Новый уровень характеристик для ВЧ-анализаторов цепей // Компоненты и технологии. 2012. № 4.
9. Афси Моавени. Проверка сложных компонентов и поиск неисправностей с помощью анализаторов цепей // Компоненты и технологии. 2013. № 9.