

Измерение сверхширокополосных многопортовых устройств

Николай Дроботун, Олег Кравченко (г. Томск)

В статье рассмотрены проблемы измерения многопортовых сверхширокополосных устройств и технические решения, предлагаемые различными производителями, а также преимущества и недостатки существующего оборудования. Подробно описан программно-аппаратный комплекс многопортовых измерений K2M-102. Приведены основные технические характеристики, схемы подключения и примеры интерфейсов программного обеспечения.

Проблемы, возникающие при измерении многопортовых устройств

Коммутационные матрицы, многопортовые делители, сплиттеры и сумматоры всё шире используются в радиотехнических системах. Помимо увеличения числа портов или каналов, наблюдается тенденция расширения диапазона рабочих частот вверх. Это существенно усложняет тестирование таких устройств.

Например, измерение S-параметров 20-портовой коммутационной матрицы с помощью 2-портового векторного анализатора цепей может занимать несколько часов. При этом вероятность ошибки возрастает пропорционально количеству портов измеряемого устройства, т.к. для каждого состояния необходимо коммутировать измерительную систему вручную. Кроме того, происходит значительный износ дорогостоящих фазостабилизированных кабельных сборок, переходов и других вспомогательных устройств. Поскольку для этих устройств производитель гарантирует стабильность

параметров только на определённое количество сочленений (например, 5000 сочленений на коаксиальный тракт 3,5 мм), то в серийном производстве резко увеличиваются затраты на амортизацию.

Для автоматизации подобных измерений различные производители предлагают как дополнительное оборудование для существующих измерительных приборов, так и автономные автоматизированные комплексы.

Ниже представлен краткий обзор популярных решений для измерения многопортовых устройств. Подробно описан программно-аппаратный комплекс K2M-102, производимый НПФ «Микран».

Обзор оборудования для многопортовых измерений

Как правило, производители измерительной техники предлагают дополнительные устройства к серийным приборам либо создают комплексы на их основе. Чаще всего используются базовый 2-портовый векторный анализатор цепей и набор коммутаторов (расширителей) на необходимое число портов. Подобные коммутаторы можно использовать и с 4-портовыми анализаторами цепей, но стоимость таких комплексов резко возрастает.

Компания Agilent предлагает использовать однополюсные USB-коммутаторы на два направления U1810B, работающие в диапазоне частот 0...18 ГГц. Данный коммутатор поддерживает стандартную функцию Plug&Play (при подключении к приборам фирмы Agilent), что сокращает время настройки сложных измерительных схем [1]. Внешний вид коммутатора показан на

рисунке 1, его характеристики приведены в таблице 1.

Производитель предлагает конфигурировать систему на необходимое число портов самостоятельно, путём увеличения числа коммутаторов U1810B. Для управления данным коммутатором используется полнофункциональная передняя программная панель (SFP), позволяющая программировать нужные последовательности переключений и задавать задержку перед каждой последовательностью [1].

Панель поддерживает несколько коммутаторов, обеспечивая измерение многопортового устройства по заданному алгоритму. К недостаткам системы, построенной на таких коммутаторах, можно отнести:

- необходимость вручную конфигурировать систему под каждый вид измерений;
- сложность калибровки;
- отсутствие автоматизации измерений.

Помимо решения на основе дополнительного USB-коммутатора, компания Agilent предлагает полноценные комплексы для многопортовых измерений, например, U3025AE10 (см. рис. 2), сконфигурированный с прибором E8364C (двухпортовый векторный анализатор цепей). Данный комплекс поддерживает полноценные измерения 12-портовых устройств с возможностью перекрёстных измерений. При наличии дополнительного устройства 551, возможна полная многопортовая калибровка с использованием нескольких электронных калибраторов или механических калибровочных наборов [3]. Также компания Agilent поставляет расширители на 4, 6, 12, 16, 20 и 22 порта.

Компания Rohde&Schwarz предлагает измерительные комплексы с аналогичными возможностями и в различных конфигурациях на основе расширителей портов ZV-Z81 и ZV-Z82 (см. рис. 3). Данные расширители могут сопрягаться с 2- и 4-портовыми приборами, обеспечивая расширение до 5, 9 и 10 портов [4]. Для калибровки подобных комплексов, как правило, используются электронные калибраторы, реализующие тип калибровки SOLT (от англ. Short – короткозамкну-



Рис. 1. USB-коммутатор Agilent U1810B

Таблица 1. Характеристики коммутатора Agilent U1810B

Параметр	Значение
Диапазон частот, ГГц	0...18
КСВН, не более	1,4
Вносимые потери, дБ, не более	0,3
Развязка, дБ, не менее	90

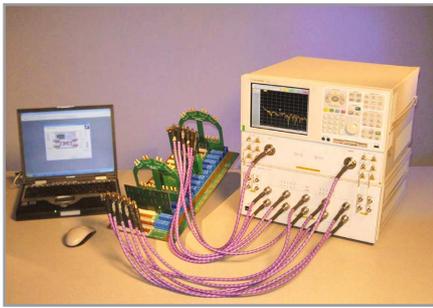


Рис. 2. Измерительный комплекс Agilent U3025AE10



Рис. 3. Измерительный комплекс Rohde&Schwarz на основе расширителя портов ZV-Z81

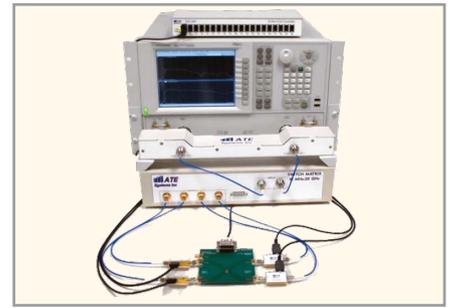


Рис. 4. Измерительный комплекс на основе расширителя портов от ATE Systems

тая нагрузка, Open – нагрузка холостого хода, Load – согласованная нагрузка и Thru – переключка между портами) либо вариации этой калибровки. Основным недостатком этих комплексов является отсутствие многопортовых электронных калибраторов, обеспечивающих полную калибровку всех портов за одно присоединение. Максимальное число портов электронного калибратора Rohde&Schwarz ZV-Z58 составляет 8, у Agilent N4433A – 4. Поэтому процесс калибровки занимает длительное время.

Компания ATE Systems предлагает 4-портовый расширитель (см. рис. 4)

для приборов сторонних производителей, работающий в диапазоне от 10 МГц до 20 ГГц. Основным отличием данного комплекса от представленных выше является функция «автокалибровки» (комплекс калибруется только с применением этой методики).

Смысл данной функции следующий. При сборке комплекса необходимо один раз откалибровать векторный анализатор по портам, а согласование и потери в измерительном тракте, возникающие при последующих измерениях с помощью расширителя портов, будут компенсироваться специальными устройствами –

контроллерами, установленными на выходе кабельных сборок по измерительной плоскости. По заявлению производителя данного комплекса, точность восстановления такой калибровки сравнима с точностью калибровки на меры TRL (от англ. Thru – переключка между портами, Reflect – мера отражения, Line – линия передачи между портами) [5].

Следует отметить, что компания Agilent также предлагает использовать подобную методику, реализуемую с помощью устройства CalPod. Особенностью данного расширителя портов является возможность гибкой

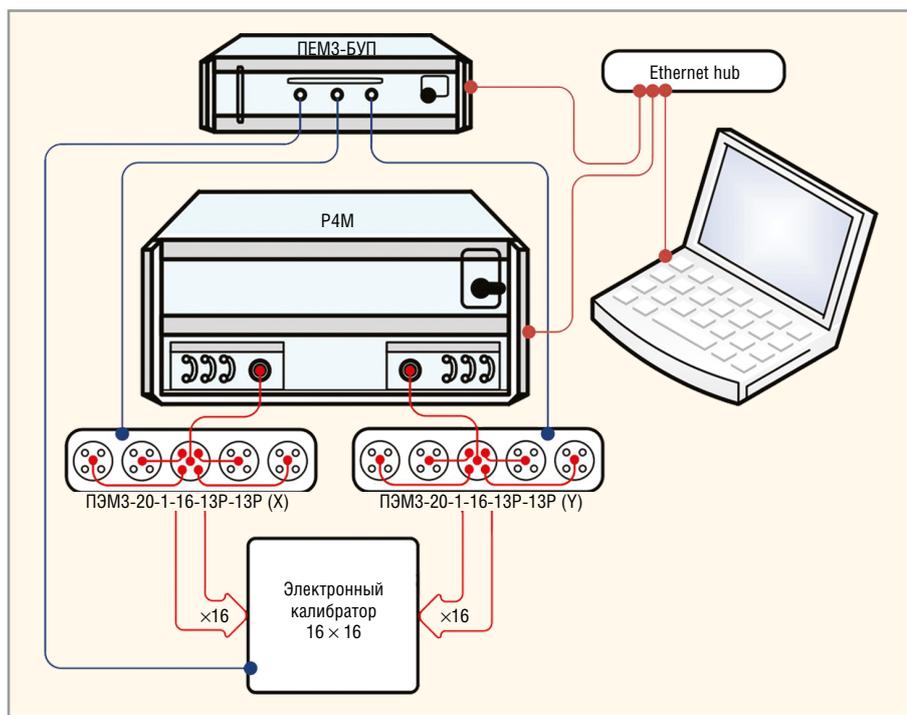


Рис. 5. Структурная схема комплекса K2M-102



Рис. 6. Внешний вид электромеханических ключей SP4T

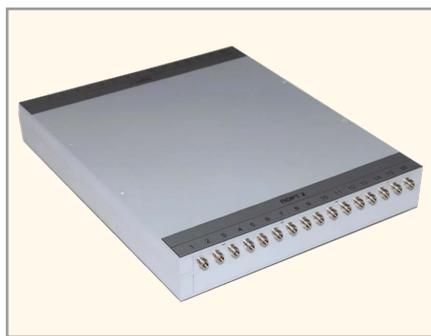


Рис. 7. Внешний вид 16-канального электронного калибратора в тракте 3,5 мм

Таблица 2. Технические характеристики P4M-18

Характеристика	Значение
Диапазон рабочих частот	От 10 МГц до 20 ГГц
Пределы допустимой относительной погрешности установки частоты при работе от внутреннего опорного генератора в течение одного года	$\pm 2 \times 10^{-6}$
Диапазон установки уровня выходной мощности, дБм	-20...0
Погрешность установки уровня выходной мощности, дБм	± 2
Диапазон измерений модуля коэффициента отражения (КО)	0...1
Диапазон измерений модуля коэффициента передачи (КП) в диапазоне частот от 125 до 20 000 МГц, дБ	-90...20
Уровень собственного шума приёмников при полосе фильтра ПЧ 10 Гц в диапазоне частот от 125 до 20 000 МГц, дБм, не более	-100
Типы соединителей мер и переходов из набора калибровочных мер	III, N, IX вар. 3, 3,5 мм и NMD 3,5

Таблица 3. Характеристики коммутационной матрицы ПЭМЗ-20-1-16-13P-13P

Характеристика	Значение
Тип переключения	SP16T
Диапазон рабочих частот, ГГц	0...20
Потери на проход, в худшей точке (20 ГГц), дБ, не более	0,8
Изоляция, дБ, не менее	140
КСВН, не более	1,2
Время переключения, мс, не более	15

программной конфигурации с помощью языков C, C++, LabVIEW, CVI или Virtual Basic [5].

Программно-аппаратный комплекс K2M-102

Комплекс K2M-102, производимый НПФ «Микран», позволяет измерять до 32 портов за одно присоединение. Основой комплекса является серийно производимый прибор P4M-18 – 2-портовый векторный анализатор цепей, основные характеристики которого (без дополнительного оборудования) приведены в таблице 2.

В состав комплекса входят:

- две коммутационные матрицы, каждая из которых может обеспечить коммутацию одного порта в 16 (ПЭМЗ-20-1-16-13P-13P);
- блок управления (ПЭМЗ-БУП);
- 2 электронных калибратора (один в тракте 3,5 мм, второй – в тракте SMP);
- устройство управления и отображения информации с предустановленным программным обеспечением;
- все необходимые принадлежности (фазостабильные кабельные сборки, кабели Ethernet и т.д.).

На рисунке 5 приведена схема подключения комплекса. Красными линиями показаны СВЧ-соединения, синими – линии управления, коричневым цветом – кабель Ethernet.

Важной частью комплекса являются коммутационные матрицы ПЭМЗ-20-1-16-13P-13P (на рисунке 5 отмечены X и Y), собранные на основе электромеханических ключей SP4T (см. рис. 6). Каждая коммутационная матрица состоит из 5 ключей. На вход центрального ключа подключается измерительный порт векторного анализатора цепей, а выходы этого ключа соединяются со входами оставшихся 4 переключателей. Таким образом, получается коммутационная матрица 1 в 16, и измерительная плоскость переносится на оставшиеся свободными выходы переключателей. Соответственно, первый порт измерительного прибора подключается к матрице X, а второй – к матрице Y. Характеристики коммутационной матрицы ПЭМЗ-20-1-16-13P-13P приведены в таблице 3.

Измерение многопортового устройства производится путём автоматизированных последовательных измерений каждого порта, т.е. анализатор цепей выполняет измерение при каждом новом состоянии коммутацион-

ной матрицы. Данные, полученные при каждом измерении, сохраняются и соответствующим образом индексируются.

Для калибровки этого комплекса был специально разработан 16-портовый электронный калибратор (ЭК), существующий в двух вариантах, – для коаксиальных трактов 3,5 мм (см. рис. 7) и SMP. Данное устройство позволяет калибровать все измерительные порты комплекса за одно присоединение. Применяется разновидность калибровки SOLT, а вместо адаптера на проход с известной задержкой используется мера «неизвестное устройство». Каждый ЭК верифицируется эталоном более высокого уровня, и, фактически, точность эталона переносится на электронное устройство с помощью математического описания.

Благодаря использованию модифицированной калибровки SOLT, комплекс может быть калиброван для проведения измерения «любой порт из 16(X) в любой другой порт из 16(Y)». Полная многопортовая калибровка занимает не более 20 минут. При использовании двухпортового калибратора данная калибровка занимает несколько часов, а при использовании механических наборов – несколько десятков часов. ЭК калибрует комплекс в диапазоне частот от 100 МГц до 20 ГГц, при этом сохраняется заявленная производителем Р4М-18 точность измерения.

Блок ПЕМ3-БУП осуществляет синхронизацию и управление всеми компонентами комплекса. Этот блок,

как и векторный анализатор цепей Р4М-18, являются сетевыми устройствами и, соответственно, имеют адреса MAC и IP. Управление коммутационными матрицами и калибратором осуществляется через специальные интерфейсы, а взаимодействие измерительного прибора с устройством управления и отображения (персональным компьютером) происходит по локальной сети. Блок ПЕМ3-БУП имеет параллельный интерфейс, который позволяет управлять измеряемыми коммутационными матрицами. На этот интерфейс, при необходимости, могут дублироваться коды управления электронным калибратором и коммутационными матрицами ПЕМ3-20-1-16-13Р-13Р.

Управление комплексом, отображение информации и обработка полученных результатов осуществляется с помощью специального программного обеспечения (ПО) К2М-102. Внешний вид комплекса К2М-102 показан на рисунке 8.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА К2М-102

Программное обеспечение К2М-102 представляет собой внешнее приложение для управления комплексом и проведения измерений с помощью сертифицированного ПО Graphit. В меню предусмотрены три режима работы: «Ручное управление», «Измерение в автоматическом режиме» и «Анализ результатов измерения» (см. рис. 9).

Режим ручного управления (см. рис. 10) обеспечивает независимое



Рис. 8. Внешний вид комплекса К2М-102, скоммутированного для калибровки

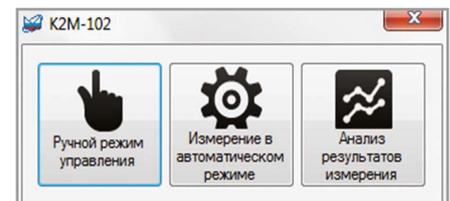


Рис. 9. Меню выбора режима работы ПО

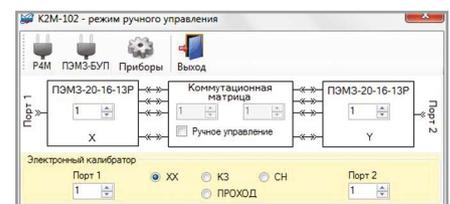


Рис. 10. Окно работы для ручного режима

управление каждым портом и исследуемым устройством, что позволяет выполнять требующийся пользователю анализ состояния. Ручной режим идеально подходит для динамической настройки исследуемого устройства (S-параметры, изоляция).

Автоматический режим (см. рис. 11) предназначен для измерения устройства по определённому сценарию и для

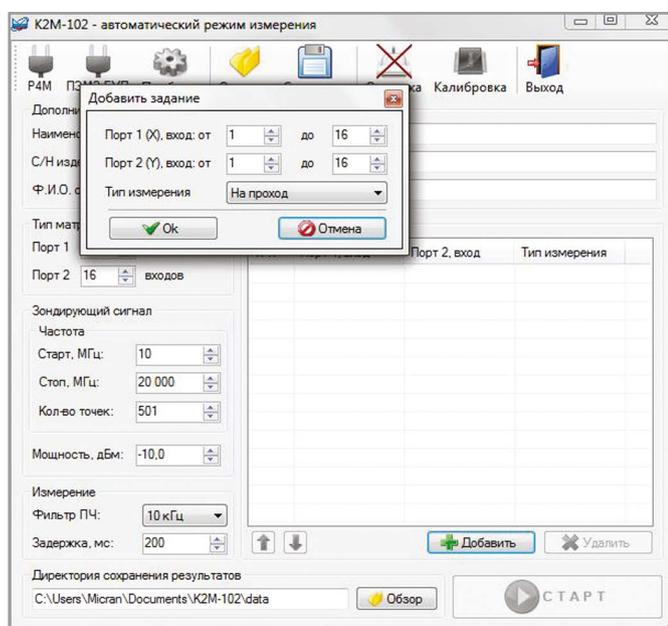


Рис. 11. Окно работы для автоматического режима

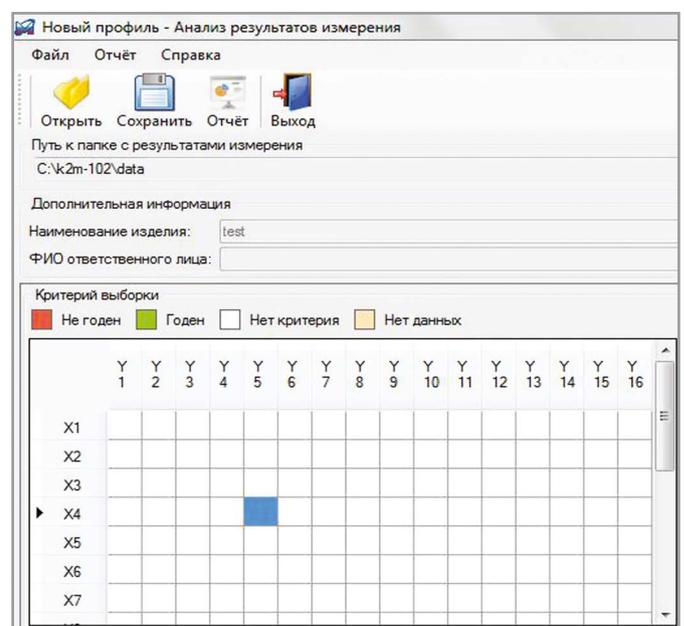


Рис. 12. Окно анализа результатов измерений

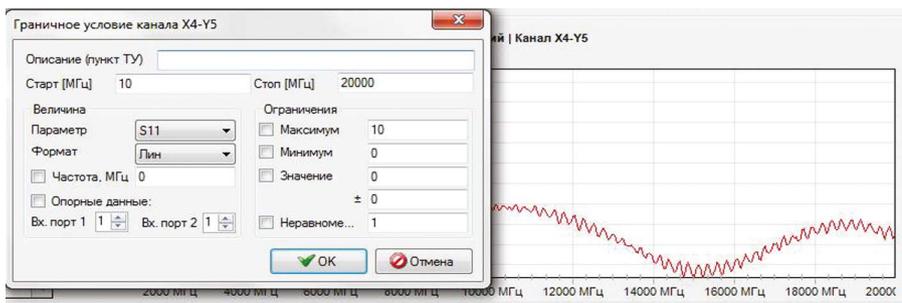


Рис. 13. Окно установки граничных условий для отбраковки измеряемых устройств

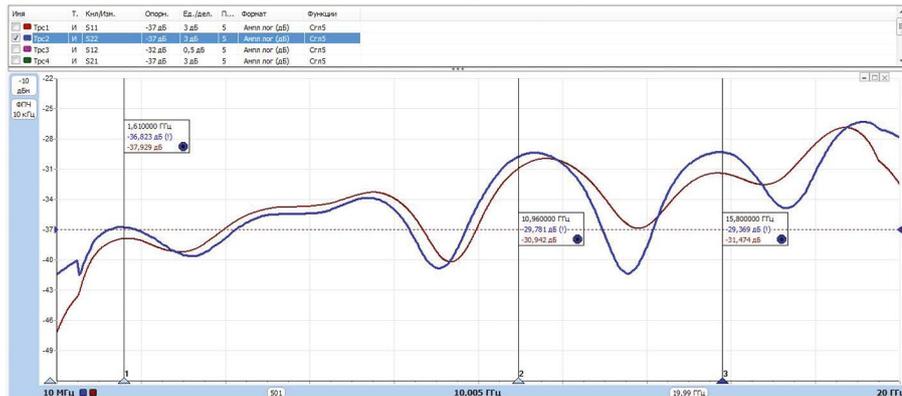


Рис. 14. Графики возвратных потерь коаксиального аттенюатора с ослаблением 30 дБ (тракт 3,5 мм)



Рис. 15. Графики АЧХ коаксиального аттенюатора с ослаблением 30 дБ (тракт 3,5 мм)

калибровки комплекса. В этом режиме задаются все необходимые условия измерения, а также типы измерений (на проход/изоляция). Создание и сохранение различных профилей настройки позволяют быстро переключаться между устройствами.

В режиме анализа результатов измерений (см. рис. 12) формируется матрица результатов. Каждый элемент этой матрицы содержит полные S-параметры испытываемого состояния, которые доступны для дальнейшего анализа.

При постановке комплекса на производство существует возможность автоматической отбраковки состояний путём формирования граничных условий для каждого типа измерений (см. рис. 13). Гибкая система формирования отчётов позволяет выводить результаты измерений в удобном для пользователя формате, что упрощает производственный процесс.

ТЕСТОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В качестве эксперимента был изменен коаксиальный аттенюатор (тракт 3,5 мм) с ослаблением 30 дБ на приборе PNA E8364B (Agilent), калиброванном на механический набор мер TRL.

Фактически, была достигнута максимальная точность измерения в данном тракте выбранным прибором. Затем этот же аттенюатор был измерен с помощью комплекса K2M-102, калиброванного 16-портовым ЭК. Результаты измерений возвратных потерь (S11) представлены на рисунке 14. Коричневая трасса – измерение на E8364B, синяя – K2M-102. Результаты измерения потерь на проход (S21) представлены на рисунке 15, где серая трасса – измерение на E8364B, сиреневая – на K2M-102.

Как видно из графиков, комплекс K2M-102 даёт ошибку измерений. Это связано с тем, что измерительный тракт удлиняется, ухудшается

эффективная направленность тракта, поскольку из-за рассогласования снижается точность калибровки. Но при создании данного комплекса не стояла задача реализовать систему метрологического класса. Данный комплекс обеспечивает измерение многопортовых устройств различной конфигурации с максимальной экономией временных и материальных ресурсов. При этом его точность является достаточной для настройки и контроля параметров при разработке и производстве СВЧ-устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каждый из описанных в статье измерительных комплексов решает свои задачи. Соответственно, пользователь или разработчик сложных многопортовых устройств должен оценивать возможности конкретного комплекса и уметь, при необходимости, правильно его конфигурировать.

Следует отметить, что многопортовые комплексы, построенные на основе измерителя с ограниченным количеством портов, почти всегда имеют худшие характеристики, чем характеристики самого измерителя, что связано с ухудшением эффективных параметров измерительной системы.

Безусловно, можно создать многопортовый измерительный комплекс метрологического уровня, который будет измерять устройства с той же точностью, что и комплексы с небольшим количеством портов. Для этого необходимо не только перенести измерительную плоскость, условно говоря, за порты прибора, но и вынести часть измерительного тракта за пределы прибора, – как можно ближе к измеряемому многопортовому устройству. Стоимость же таких комплексов в большинстве случаев будет неоправданно высокой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кай-Ньян Чае. Коаксиальный коммутатор с USB-интерфейсом для коммутации ВЧ- и СВЧ-сигналов. Электронные компоненты. № 4. 2013. С. 52.
2. Agilent U1810B USB Coaxial Switch SPDT, DC to 18 GHz. Technical Overview.
3. Agilent Technologies U3025AE10. User Guide.
4. http://www.rohde-schwarz.com/en/product/switchmatrix-options_63490-41857.html.
5. <http://mwrf.com/test-amp-measurement-analyzers/speeding-multiport-vna-calibrations>.

