

# Keysight Technologies

Оптимизация производительности при  
испытаниях передающих/приёмных модулей

Заметки  
по применению



## Обзор

Радиолокационные станции (РЛС), спутники и системы радиоэлектронного подавления (EW) используют множество микроволновых модулей. В этих заметках по применению рассмотрен общий круг проблем, которые могут возникнуть при испытаниях в процессе разработки и производства. Здесь кратко проиллюстрированы эти проблемы с акцентом на передающие/ приёмные модули (T/R), используемые в системах РЛС.

T/R модули выпускаются в больших количествах для использования в системах РЛС с фазированной антенной решёткой, одна из которых показана на рисунке 1. Аппаратные средства T/R устанавливаются за каждым антенным элементом в фазированной решётке; поэтому потенциально требуются сотни или тысячи модулей для одной РЛС.

(a)



(b)



*Рисунок 1 – Современные РЛС с фазированной антенной решёткой (a) могут содержать тысячи T/R модулей (b), которые часто требуют большого объёма испытаний.*

T/R модули являются либо частью антенны, либо устройствами, ближайшими к антенне. В результате они оказывают основное влияние на ВЧ характеристики РЛС. В процессе передачи выходной ВЧ импульс усиливается модулем, определяя тем самым максимальную излучаемую мощность РЛС. В процессе приёма малошумящий усилитель (LNA) на входе модуля определяет коэффициент шума системы и, следовательно, минимальный обнаруживаемый сигнал. В каждом тракте программируемые фазовращатели и аттенюаторы управляют направлением луча и определяют угловую точность РЛС.

## Проблема

Поскольку РЛС с фазированной решёткой включает тысячи T/R модулей, повышение производительности их испытаний становится важным требованием. Типично T/R модули нуждаются в большом объёме испытаний, позволяющих гарантировать, что все модули подходят для работы в фазированной решётке, в которой они используются.

Дело осложняется ещё и тем, что многие из таких модулей являются интеллектуальными устройствами, которые работают в различных режимах и требуют для каждого испытания множества команд от автоматизированного испытательного оборудования (ATE). Кроме того, испытание каждого модуля в процессе сборки выполняется за несколько шагов и требуется прослеживаемость результатов измерений от шага к шагу.

Полная стоимость испытаний непосредственно связана с тремя основными факторами: трудозатраты, стоимость оборудования и суммарное время испытаний, накопленное в процессе выполнения всех шагов. Исторически производительность испытаний повышалась за счёт исключения процедур, на которые наиболее сильно влияют ограничения быстродействия испытательных приборов. Стоимость оборудования в первую очередь определяется назначением требуемого микроволнового оборудования и значительно меньше влияет на общую стоимость испытаний, чем время испытаний.

## Решение

Правильная оценка рабочих характеристик каждого T/R модуля требует целого ряда измерений (рисунок 2). Поскольку T/R модуль является входным устройством приёмника, для него требуется типовой набор измерений, таких как измерение коэффициента шума, частотной характеристики, коэффициента усиления и согласования по входу.



**Рисунок 2 – T/R модули являются главными связующими устройствами между антенной РЛС и приёмником. Активные компоненты – фазовращатели и переменные аттенюаторы требуют испытания в нескольких состояниях.**

Наибольшее время обычно занимает измерение характеристик аттенюатора и фазовращателя. Эти измерения являются обычно взаимосвязанными, поскольку аттенюатор влияет на фазовращатель и наоборот. В результате каждый из них может иметь от 32 до 256 возможных состояний, что требует очень большого числа испытаний, если измерения выполняются для всех перестановок. Поскольку эти состояния зависят от частоты, измерения должны выполняться на многих частотах. Важно заметить, что измерения не могут выполняться просто свипированием отклика испытываемого устройства (ИУ) с помощью векторного анализатора цепей, поскольку измерение в каждой точке данных требует изменения состояния ИУ.

Аналогичные измерения выполняются для характеристик передатчика. Например, типично выполняются измерения тех же параметров усиления и согласования по выходу, а также аттенюации и программирования фазы (с теми же проблемами, что и для приёмника). Вместо коэффициента шума и частотной характеристики измеряется зависимость компрессии усиления или максимальной выходной мощности от частоты. Поскольку передатчик работает в импульсном режиме, обычно измеряются параметры выходного импульса: пульсации фазы и амплитуды в пределах импульса, длительности импульса, фронта и среза.

Окончательный набор измерений включает измерения общих параметров модуля, таких как временные соотношения, потребление тока и состояние модуля. Временные задержки могут регулироваться для достижения оптимальной настройки временных соотношений модуля при переключении между режимами передачи и приёма. После окончания измерения всех характеристик обычно выполняется загрузка калибровочных коэффициентов в электрически перепрограммируемое ПЗУ (EEPROM) специализированной ИС (ASIC) управления модулем. Затем выполняются дополнительные измерения для подтверждения правильной, калиброванной работы.

## Обзор измерения

Для определения характеристик каждого канала T/R модуля может потребоваться большое число измерений. Фактическое число измерений может быть более 25 с множеством вариантов, в зависимости от производителя и применения (таблица 1).

**Таблица 1 – Типичные измерения для T/R модулей**

Секция модуля	Ключевые измерения
Приёмник	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Зависимость коэффициента усиления и КСВн от частоты</li> <li>– Зависимость коэффициента шума от частоты</li> <li>– Спектр: гармоники, паразитные и интермодуляционные составляющие</li> <li>– Зависимость затухания и сдвига от частоты               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Программируемость (от пяти до восьми бит для каждого параметра)</li> <li>– От 1000 до 65000 состояний на каждой частоте</li> </ul> </li> </ul>
Передатчик	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Зависимость коэффициента усиления и КСВн от частоты</li> <li>– Зависимость затухания и сдвига от частоты</li> <li>– Зависимость компрессии усиления (максимальной мощности передатчика) от частоты</li> <li>– Параметры импульса: амплитуда и фаза, длительность импульса, время нарастания и спада</li> </ul>
Другие	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Временные задержки (программируемые)</li> <li>– Ток: пиковый и средний</li> <li>– Состояние модуля</li> </ul>

На различных стадиях процесса разработки группа разработчиков может выполнять все эти измерения. Однако в процессе производства обычно выполняется определённое подмножество этих измерений, и ограничение объёма испытаний основывается на статистических данных, полученных из опыта разработок. Фактическое число измерений, выполняемых в процессе производства, варьируется производителем и зависит также от характеристик T/R модуля и требований контракта. Если время испытаний становится ниже определённого порога, производственные группы часто отказываются от ускорения выпуска продукции и вместо этого выполняют большее число испытаний, поскольку дополнительные данные могут потом значительно сократить объём испытаний в процессе окончательной интеграции системы.

В целях сравнения предполагается, что T/R модуль имеет 6-битовый код управления фазовращателем и аттенюатором. Тенденция в конструировании T/R модулей состоит в увеличении плотности упаковки с размещением более чем одного канала в корпусе. Число каналов может быть от одного или двух до 16. Для примера предположим, что T/R модуль имеет четыре канала передачи и четыре канала приёма. Для получения полного набора характеристик такого модуля, перекрывающего все комбинации установок фазы и ослабления, требуется более 100000 измерений, как показано в таблице 2.

## Компромиссы повышения производительности при использовании традиционной системы

Выполнение такого широкого набора измерений при использовании традиционной испытательной платформы занимает более 10 часов. Основной вклад в длительность испытаний дают три из них: измерение фазы и ослабления (из-за очень большого числа подлежащих испытанию состояний), измерение компрессии и коэффициента шума.

Очевидно, что 10-часовые испытания неприемлемы для производственной установки. В реальности 10-часовой период испытания становится препятствием и для процесса разработки, особенно если нужно измерять характеристики T/R модуля в диапазоне рабочих температур. Длительное время испытаний делает маловероятным выполнение полного набора измерений на регулярной основе.

Самый простой путь сократить время испытаний – уменьшение числа измерений, особенно фазы и ослабления. Так, значительное время может быть сэкономлено с помощью двух изменений: все состояния фазы измеряются при одной установке ослабления, и все ослабления измеряются при одном состоянии фазы (а не при всех комбинациях обоих параметров). Измерение фазы и ослабления таким способом проверяет работу двух программируемых устройств, но не даёт полной характеристики работы всего T/R модуля или картины взаимодействия между этими двумя параметрами.

Измерение коэффициента шума и компрессии усиления тоже занимает длительное время, поскольку при этом требуется использовать большое число частотных точек. Подобно тому, как это делается для фазы и ослабления, уменьшение числа частотных точек может ускорить процесс испытания.

С помощью этих изменений общее время испытания для 4-канального устройства может быть уменьшено до вполне приемлемого значения в 10 – 20 минут. Экономически это наиболее эффективно для производственной линии.

Таблица 2 – Общее число измерений, необходимых для определения характеристик T/R модуля (выделенные виды измерений занимают самое длительное время)

Вид измерения	Идеальное требование			
	Каналы	Точки	Частоты	Общее
Приёмник: коэффициент усиления и КСВн	4	2	201	1608
<b>Приёмник: коэффициент шума</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>44</b>
<b>Приёмник: фаза и ослабление</b>	<b>4</b>	<b>4096</b>	<b>3</b>	<b>49152</b>
Приёмник: спектр	4	2048	1	8192
Передатчик: коэффициент усиления и КСВн	4	2	201	1608
<b>Передатчик: фаза и ослабление</b>	<b>4</b>	<b>4096</b>	<b>3</b>	<b>49152</b>
<b>Передатчик: компрессия усиления</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>201</b>	<b>804</b>
Передатчик: параметры импульса	4	20	1	80
Временные соотношения	4	24	1	96
Ток питания	4	3	1	12
Состояние модуля	1	1	1	1
<b>Общее число измерений</b>				<b>110,749</b>

Кроме того, все измерения выполняются при более чем одном состоянии коэффициента усиления/фаза, чтобы гарантировать линейный режим. Примечание: в приведённом выше примере используются аттенюаторы и фазовращатели с 6-битовым кодом управления. Современные модули используют компоненты с 8-битовым кодом управления, что ещё увеличивает число испытываемых состояний.

Следует заметить, что измерения времени нарастания, спада и длительности импульса T/R модуля ненадёжны, если генерируемый системой стимулирующий импульс короче, чем время стробирования передачи в специализированной ИС управления (т.е. модуль вырезает импульс из непрерывного колебания (CW)). Генератор сигналов в испытательной системе обычно имеет более длительное время нарастания и спада, чем испытываемый модуль.

Таблица 3 – Решения для испытания T/R модулей на основе приборов серии X компании Keysight обеспечивает огромное повышение производительности. Уменьшения числа измерений для сокращения времени испытания, необходимого в традиционных системах, в системах испытания T/R модулей на базе приборов серии X компании Keysight больше не требуется.

Вид измерения	Традиционная система испытания T/R модулей						Система испытания T/R модулей на базе приборов серии X компании Keysight			
	Идеальные требования			Сокращённые для производства			Идеальные требования			
	Каналы	Точки	Частоты	Общее	Точки	Частоты	Общее	Точки	Частоты	Общее
Приёмник: коэффициент усиления и КСВн	4	2	201	1608	2	201	1608	2	201	1608
<b>Приёмник: коэффициент шума</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>44</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>44</b>
<b>Приёмник: фаза и ослабление</b>	<b>4</b>	<b>4096</b>	<b>3</b>	<b>49152</b>	<b>128</b>	<b>3</b>	<b>1536</b>	<b>4096</b>	<b>3</b>	<b>49152</b>
Приёмник: спектр	4	2048	1	8192	2048	1	8192	2048	1	8192
Передачик: коэффициент усиления и КСВн	4	2	201	1608	2	201	1608	2	201	1608
<b>Передачик: фаза и ослабление</b>	<b>4</b>	<b>4096</b>	<b>3</b>	<b>49152</b>	<b>128</b>	<b>3</b>	<b>1536</b>	<b>4096</b>	<b>3</b>	<b>49152</b>
<b>Передачик: компрессия усиления</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>201</b>	<b>804</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>201</b>	<b>804</b>
Передачик: параметры импульса	4	20	1	80	20	1	80	20	1	80
Временные соотношения	4	24	1	96	24	1	96	24	1	96
Ток питания	4	3	1	12	3	1	12	3	1	12
Состояние модуля	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Общее число измерений</b>				<b>110,749</b>			<b>14,693</b>			<b>110,749</b>
Время испытания				10 ч			12 мин			45 с

При разработке современных систем испытания T/R модулей особое внимание обращается на скорость измерений. Компания Keysight совместно со своими партнёрами разработала и предлагает законченные технические решения, позволяющие оптимизировать производительность. Полученные в результате системы могут выполнять полное измерение характеристик T/R модулей, включающее более 100000 измерений, в среднем менее чем за 45 секунд (таблица 3). В зависимости от состава измерений эта испытательная платформа последнего поколения может выполнять на порядок больше измерений за время, не превышающее 1/10 времени, которое затрачивает испытательная система предыдущего поколения. В результате общее быстродействие повышается приблизительно на два порядка.

В зависимости от числа каналов в модуле доминирующим фактором при производственных испытаниях является, вероятно, время, требуемое для установки и снятия нагрузки ИУ. Это ограничение минимизируется решением, которое позволяет

нагружать следующее ИУ, пока испытывается текущее. Важное значение имеет то обстоятельство, что здесь не происходит дальнейшего выигрыша от уменьшения числа измерений, так как если выполняется меньшее число измерений, имеет место очень незначительное увеличение производительности.

Платформа современного поколения использует приборы серии X компании Keysight (рисунок 3), одновременно поддерживая преимущества предыдущего поколения.

- Аппаратные и программные средства на основе коммерческих продуктов упрощают использование и поддержку системы
- Управление приборами на основе виртуальных передних панелей (самый последний стандарт) очень хорошо подходит для потребностей разработки
- Результаты испытаний находятся в хорошем соотношении с результатами измерений, выполненных в процессе разработки (при использовании подобного оборудования)



- Векторный анализатор цепей серии PNA-X
- Анализатор сигналов серий PXA/MXA
- Генератор сигналов серии MXG
- Цифровой запоминающий осциллограф

Рисунок 3 – При интегрировании технических решений по испытаниям наших партнёров в решения компании Keysight приборы серии X могут выполнять на порядок больше измерений за время, не превышающее 1/10 общего времени на проведение испытания, которое требуется при использовании технических решений предыдущего поколения.

Испытательные решения последнего поколения способны достичь огромного повышения производительности, используя преимущества шести ключевых факторов.

- Увеличение быстродействия самих приборов путём введения ряда усовершенствований
- Высокая степень оптимизации испытательных алгоритмов, которая способствует оптимальному использованию возможностей прибора
- Программное обеспечение со следующими преимуществами: Очень низкие непроизводительные затраты при вызове испытательных алгоритмов и управлении данными
  - Совмещение операций ввода-вывода: новые измерения выполняются, пока данные предыдущих выводятся
  - Совмещение измерений с помощью архитектуры, которая позволяет выполнять измерения одновременно, используя различные приборы
- Аппаратное управление ИУ и приборами, что исключает задержки, свойственные программному управлению
- Предварительная обработка тестов при первом запуске программы испытаний (ускоряет испытание последующих устройств)
- Одновременное испытание, подключение и отключение нагрузки нескольких устройств

## Выгоды для разработки и производства

Возможность использования стандартных приборов для достижения максимально высокой производительности открывает новые возможности для пользователей как в области разработки, так и производства. В области разработки очень высокая скорость испытания даёт возможность измерять все режимы работы модуля и все параметры с очень высоким разрешением (поиск аномалий) за несколько секунд. Разработчикам теперь не нужно идти на компромисс между длительностью цикла обработки и количеством собранных данных. Все это вселяет надежду на возможность выполнения более глубоких испытаний в экстремальных условиях (температура, механическое воздействие, влияние окружающей среды), поскольку электрические параметры могут быть изменены быстрее, чем изменяются внешние условия. Большое количество собранных данных может быть также использовано для улучшения моделирования компонентов.

Для производства наиболее важным является сокращение времени испытаний, что даёт огромную экономию общих расходов на испытания. Возможность поддерживать перенос результатов каждого шага испытаний от разработки до производства имеет два преимущества: помогает обеспечить поставку качественной продукции и совершенствует процесс производства, помогая выявить источники изменения параметров. Кроме того, исчерпывающие испытания снижают риск поставки потребителю модуля с одним или более отклонений от нормы. Это также даёт потенциальную возможность увеличения выхода годной продукции благодаря использованию более узких пределов допуска, поскольку измеряются все точки данных. И наконец, всеобъемлющие испытания позволяют сортировать и подбирать модули для удовлетворения специфических требований, возможно за дополнительную плату.

## Краткие выводы

При разработке любой испытательной системы успех зависит от подбора состава разработчиков и уровня технологии. Поскольку технология системы становится более сложной, обеспечение её готовности приобретает определённые трудности. Это в особенности относится к радиолокационным, спутниковым системам и системам радиоэлектронного подавления, которые используют большое количество разнообразных ВЧ и микроволновых модулей.

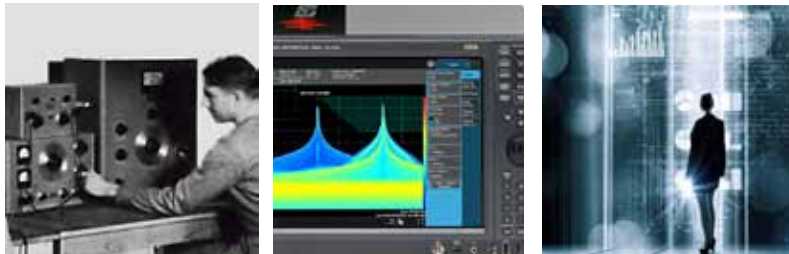
Сегодня T/R модули требуют обширного испытания как в условиях разработки, так и производства. Поскольку количество и сложность T/R модулей увеличиваются, производительность испытаний становится основным фактором, определяющим их стоимость.

Приборы серии X компании Keysight, используемые в микроволновых испытательных платформах последнего поколения, обеспечивают 100-кратное ускорение испытаний по сравнению с системами предыдущего поколения. Время испытаний и связанная с ним стоимость теперь приближается к времени подключения и отключения нагрузки ИУ, что даёт возможность получить больше полезных данных при выпуске продукции. Использование одних и тех же приборов и при разработке, и в производстве обеспечивает переносимость результатов в пределах всех измерений, выполняемых на продукции – от разработки до окончательного производства.

## Развиваемся с 1939 года

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, услуг, знаний и опыта наших инженеров поможет вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От HewlettPackard и Agilent к Keysight.



**myKeysight**

**myKeysight**

[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)

Персонализированная подборка только нужной вам информации.

[http://www.keysight.com/find/emt\\_product\\_registration](http://www.keysight.com/find/emt_product_registration)

Зарегистрировав свои приборы, вы получите доступ к информации о состоянии гарантии и уведомлениям о выходе новых публикаций по приборам.

**KEYSIGHT SERVICES**  
Accelerate Technology Adoption.  
Lower costs.

**Услуги ЦСМ Keysight**

[www.keysight.com/find/service](http://www.keysight.com/find/service)

Центр сервиса и метрологии Keysight готов предложить вам свою помощь на любой стадии эксплуатации средств измерений – от планирования и приобретения новых приборов до модернизации устаревшего оборудования. Широкий спектр услуг ЦСМ Keysight включает услуги по поверке и калибровке СИ, ремонту приборов и модернизации устаревшего оборудования, решения для управления парком приборов, консалтинг, обучение и многое другое, что поможет вам повысить качество ваших разработок и снизить затраты.



[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)

Keysight Technologies, Inc.  
Сертифицировано DEKRA на соответствие стандарту ISO 9001:2015  
Система управления качеством



**Планы технической поддержки Keysight**

[www.keysight.com/find/AssurancePlans](http://www.keysight.com/find/AssurancePlans)

ЦСМ Keysight предлагает разнообразные планы технической поддержки, которые гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

**Торговые партнеры Keysight**

[www.keysight.com/find/channelpartners](http://www.keysight.com/find/channelpartners)

Получите лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий ассортимент решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами.

[www.keysight.com/find/ad](http://www.keysight.com/find/ad)

Российское отделение

**Keysight Technologies**

115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: [tmo\\_russia@keysight.com](mailto:tmo_russia@keysight.com)

[www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

Сервисный Центр

Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб.,  
стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: [tmo\\_russia@keysight.com](mailto:tmo_russia@keysight.com)

(ВР-16-10-14)