

Разработка современной модульной системы тестирования радиолокаторов

Shivansh Chaudhary

National Instruments, Остин, Техас

Lennart Berlin

Saab Aerodefense, Стокгольм, Швеция

Современные радиолокационные системы требуют передовых методов тестирования и верификации для гарантии их работоспособности в сложных и зашумленных коммуникационных средах, а также для гарантии полного соответствия техническим характеристикам и возможности их дальнейшего усовершенствования. Когда инженеры конфигурируют систему автоматизированного тестирования радиолокационных систем, одними из самых важных измерительных приборов, используемых для оценки качества системы, являются генератор радиочастотных/микроволновых сигналов и анализатор спектра. Генератор сигналов может использоваться в качестве формирователя тестовых стимулирующих воздействий для точной симуляции рабочей среды, а генератор стандартных функций - для управления схемами импульсной, АМ и FM модуляции генератора аналоговых сигналов. В приемнике принимаемые антенной слабые сигналы могут быть обнаружены и усилены анализатором спектра с широким динамическим диапазоном и низким фазовым шумом.

Последние достижения в технологиях радиолокации, например, такие, как активная фазированная антенная решетка (AESA) и многофункциональные системы, требования к тестированию радиолокационных систем становятся все более сложными. В этой статье рассматриваются эти проблемы и требования к современной системе автоматизированного тестирования (АТЕ), которая способна проводить испытания радиолокаторов следующего поколения.

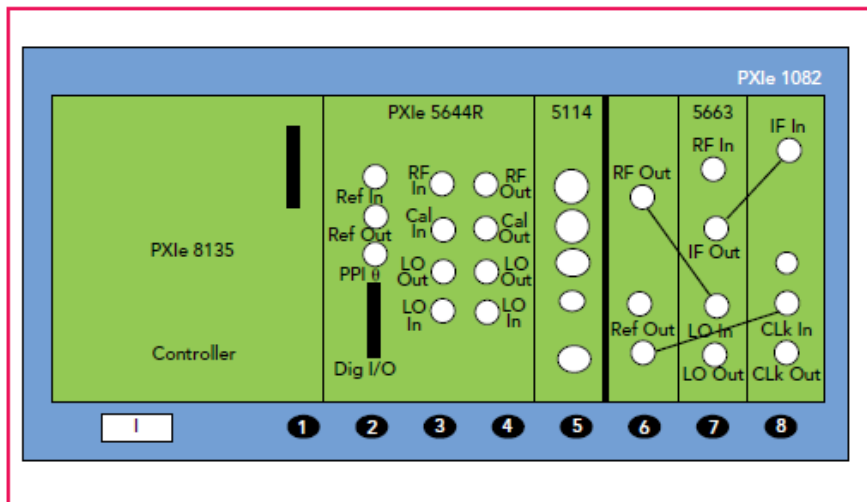
ИСПЫТАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Современные радиолокационные системы должны уметь обнаруживать цели в сложных условиях внешней среды, для чего требуется приемник с искажениями более низкими, чем в применявшихся ранее системах. Чтобы соответствовать самым строгим требованиям к приемнику для испытаний, необходим источник, который может генерировать сигнал с низким фазовым шумом, превосходными частотными характеристиками и малыми искажениями. Из-за трудностей, связанных с прямым преобразованием из цифровой области в сигналы микроволновых частот и наоборот, обычно для многоступенчатого преобразования используется более одного гетеродина (LO). При использовании нескольких гетеродинов все они должны быть как можно точнее и быстрее синхронизированы по частоте и по фазе. Чем быстрее они могут быть синхронизированы по фазе и на требуемой частоте, тем меньше общее время измерения и тестирования. Синхронизация особенно важна для ASA-радаров, поскольку они состоят из тысячи приемников, подключенных к антеннам, каждый из которых необходимо синхронизировать.

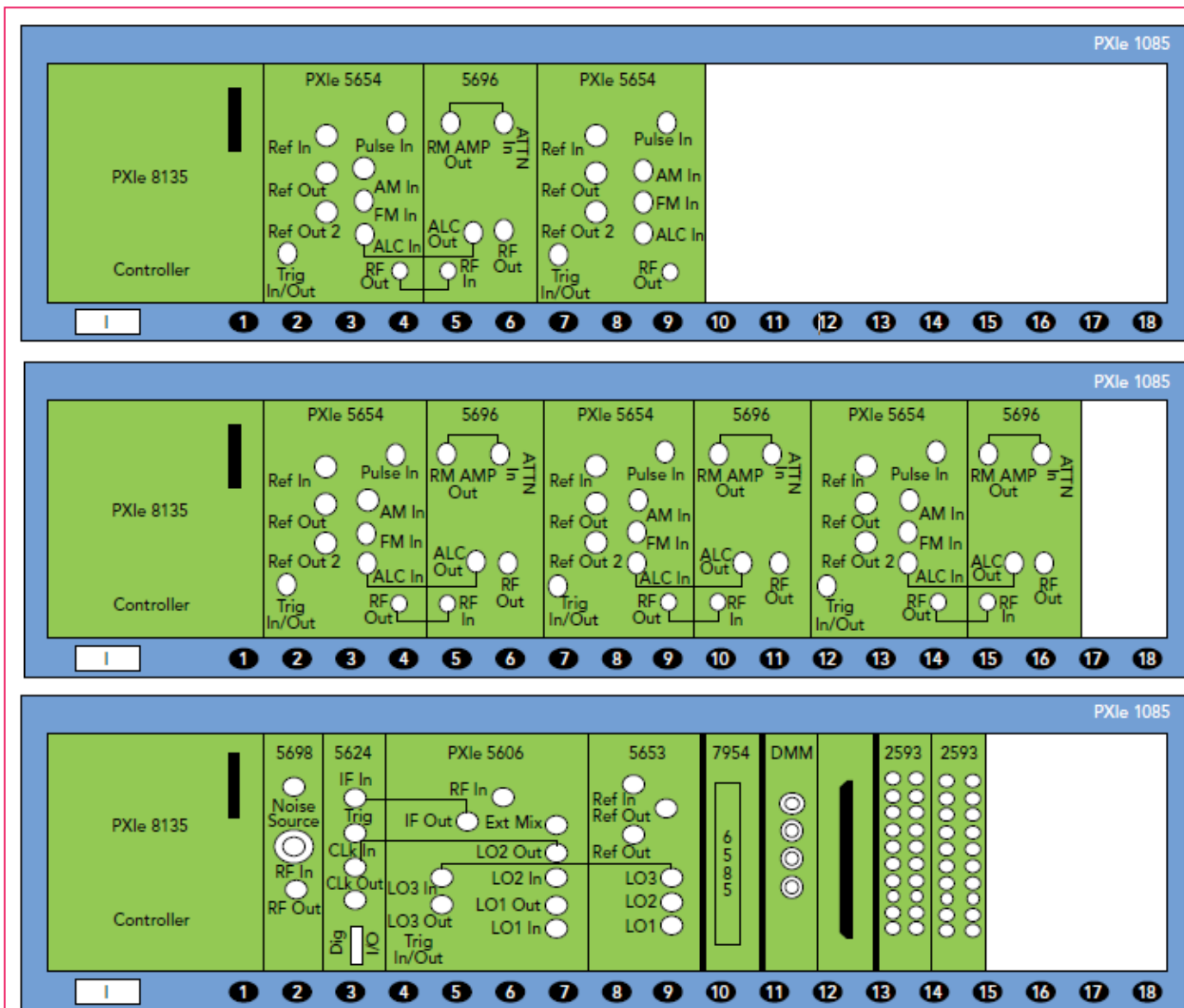


▲ Рис. 1. AESA-радиолокатор Giraffe 4A.

Как уже упоминалось, при тестировании приемников радиолокаторов можно использовать генераторы для генерации различных тестовых сигналов, от импульсного CW и до импульсов с ЛЧМ, использующих частотную модуляцию и развертку. Обычно для испытаний радиолокаторов используют импульсные радиочастотные/микроволновые сигналы, и характеристики импульса в значительной степени определяют производительность и возможности системы. Например, мощность импульса определяет расстояние до цели, а длительность импульса - пространственное разрешение. При испытаниях и верификации радаров генератор сигналов может использоваться в качестве источника для замены гетеродина. Низкий фазовый шум и высокая спектральная чистота генератора сигналов обеспечивают приемнику более широкий динамический диапазон и более высокую чувствительность при измерениях.



▲ Рис. 2 Симулятор боя, состоящий из векторного анализатора сигналов NI PXIe-5663 для выполнения измерений на RF-частотах, дигитайзера PXIe-5114 в качестве осциллографа и векторного приемопередатчика сигналов PXIe-5664R для симуляции сценариев реального времени с помощью встроенной, программируемой пользователем FPGA.



▲ Рис. 3 Три шасси PXI радиолокатора Giraffe 4A.

Появление многофункциональных радиолокационных систем AESA привело к беспрецедентному повышению производительности, надежности и скорости сканирования радаров. Типичная архитектура AESA включает тысячи приемопередающих модулей (T/R), каждый из которых имеет свою антенну. Кроме сложности конструкции, перед областью испытаний и верификации радиолокаторов стоит задача точного выравнивания по фазе и амплитуде каждого приемопередающего модуля.

AESA-РАДАР GIRAFFE 4A

Радары AESA значительно эволюционировали за последние тридцать лет, используя постоянные усовершенствования технологий обработки сигналов и радиочастотных/микроволновых технологий, например, GaN-усилители мощности, микроволновые монокристаллические интегральные схемы (MMIC), интегральные схемы для миллиметровых волн - все это привело к снижению стоимости приемопередающих модулей. В отличие от обычной механически сканирующей решетки (MSA) или пассивной сканирующей антенной решетки (PESA) радиолокаторы с AESA позволяют осуществлять цифровое и независимое управление коэффициентом усиления и фазой приемопередающего модуля. Это обеспечивает значительное преимущество в формировании и маневренности луча радара. Радары с AESA намного надежнее традиционных, в основном потому, что тысячи независимых приемопередающих модулей - вместо одного канала - позволяют радару сохранять работоспособность при некотором уровне отказов, не отключая всю систему. Модульный подход AESA обеспечивает возможность безболезненной замены приемопередающих модулей более совершенными элементами по мере их появления, что приводит к заметному повышению производительности.

Один из примеров многофункционального радиолокатора с AESA является радар Saab Giraffe 4A (см. рисунок 1). Giraffe 4A - это программно определяемый радиолокатор с многофункциональной эксплуатационной гибкостью; оператор может адаптивно переключаться между различными режимами работы, динамически модифицируя задачи обработки сигналов и сами сигналы. Giraffe 4A отлично подходит

для методического разбора, чтобы подчеркнуть требования к модульной автоматизированной системе тестирования радаров, необходимой для удовлетворения требований к испытаниям радиолокационных систем.

Радар «Giraffe 4A» состоит из трех функциональных элементов: возбуждителя, приемника и антенны. Основные требования к тестированию и характеристикам каждого из этих элементов приведены ниже:

Возбудитель: основная роль возбудителя - возбуждение внутренних гетеродинов приемников и формирование сигнала несущей для передатчиков. Генерируемые сигналы должны быть стабильными, иметь низкий фазовый шум, низкую паразитную составляющую, и быстро переключать частоты. Низкий уровень паразитных гармоник обеспечивает чистоту передаваемого сигнала. Когда на приемник поступает чистый сигнал гетеродина, приемнику гораздо легче распознать интересующий сигнал в зашумленной среде.

Приемник: функции приемника заключается в извлечении слабых отраженных сигналов, принимаемых антенной, усилении их без добавления шума или искажений и передаче их в процессор для восстановления импульсов/обработки сигналов. Приемник должен иметь низкий уровень шума и высокую невосприимчивость к помехам. Шум приемника (точнее, чувствительность) ограничивает диапазон радара. Низкий фазовый шум имеет решающее значение для обнаружения и отслеживания небольших изменений целей. Приемник должен также обладать широким динамическим диапазоном для предотвращения насыщения системы большими помехами.

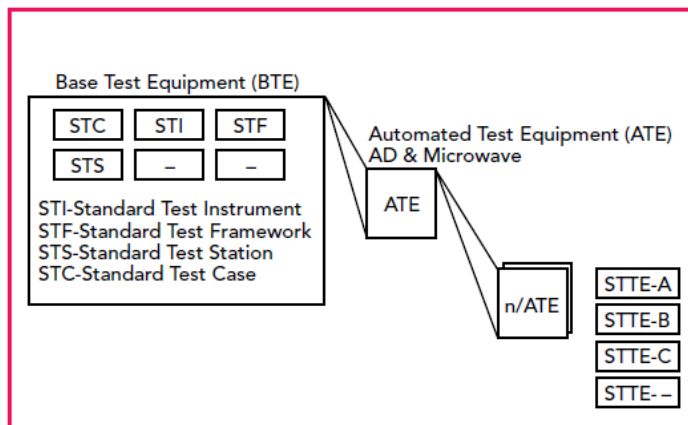
Антенна: антенна принимает энергию электромагнитного поля и излучает электромагнитные волны, создаваемые возбудителем. Антенна AESA состоит из излучающих элементов и сети антенн, приемопередающих модулей и связанных с ними управляющих схем, радиочастотных формирователей луча, распределителя

питания постоянного тока и контроллера для управления лучом. Антенна должна иметь точный основной лепесток (область вокруг направления максимального излучения), боковые лепестки низкого уровня для минимизации излучения в нежелательных направлениях, и быстрое управление основным лепестком для формирования луча.

МОДУЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ТЕСТИРОВАНИЯ РАДАРОВ

Для тестирования и исследования характеристик субмодулей радара Giraffe 4A, инженеры Saab решили использовать PXIe-5668 компании National Instruments (NI) - многокаскадный супергетеродинный векторный анализатор сигналов (VSA) частотой 26,5 ГГц. Наряду с низким уровнем паразитных гармоник, векторный анализатор NI предлагает необходимый динамический диапазон с разумным временем развертки во всей мгновенной полосе пропускания 765 МГц. Модульный форм-фактор PXIe-5668R хорошо подходит к стандарту стэндов Saab для испытаний радаров. Для удовлетворения ограничений по стоимости и размерам инженеры-испытатели Saab разработали собственную систему измерения фазового шума с использованием модульных приборов NI PXIe. Измерение фазового шума разбивает полученный сигнал на два канала, преобразует каждый с понижением частоты в немодулированные аналоговые сигналы с использованием гетеродинных сигналов и подает эти аналоговые сигналы на дигитайзеры для кросс-корреляции.

В системе используются также другие приборы PXIe, например, модули цифрового ввода-вывода, модули коммутатора и драйверы для



▲ Рис. 4 Компоненты ВТЕ предоставляют ресурсы для испытаний тестируемых устройств

ТАБЛИЦА 1	
КОМПОНЕНТЫ БАЗОВОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	
Компонент	Функция
Стандартные приборы для тестирования (STI)	Список приборов, сертифицированных для применения в АТЕ, вместе с сертифицированными драйверами
Стандартный тестовый фреймворк (STF)	Программные стандарты, являющиеся основой АТЕ
Стандартная испытательная станция (STS)	Все прочие материалы, которые могут использоваться для создания компонентов АТЕ
Стандартные тест-кейсы (STC)	Актуальная версия последовательностей для управления тестами

управления понижающими преобразователями, умножителями, делителями и схемами коммутации. Вся система измерения фазового шума управляется из LabVIEW. Для тестирования антенн инженеры-испытатели построили закрытый тестовый полигон и симулировали боевой сценарий с помощью симулятора сценариев на основе NI PXIe с удаленным доступом из приложения LabVIEW (см. **рисунок 2**).

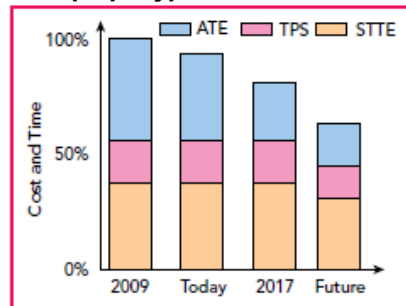
Модульная природа испытательных установок, использующих LabVIEW, позволила интегрировать много измерительных приборов в одну современную автоматизированную систему для тестирования радаров. Эта система состоит из трех шасси PXIe (см. **рисунок 3**), в которые установлены пять генераторов RF-сигналов PXIe-5654, четыре модуля расширения диапазона амплитуд PXIe-5696 и векторный анализатор сигналов PXIe-5668R с малозумящим микроволновым входным интерфейсным каскадом. В состав системы входит также плата NI FPGA с модулем ввода-вывода сигналов LVDS, который в основном используется в качестве контроллера для передачи и приема команд тестируемому устройству (UUT).

В систему входит NI модуль драйверов реле для управления коммутацией средств подключения АТЕ, модуль PXI коммутаторов для маршрутизации микроволновых сигналов в АТЕ, NI PXI цифровой мультиметр (DMM) и PXI модули мультиплекторов для маршрутизации низкочастотных сигналов. В дополнение к трем шасси PXI в системе АТЕ используются две 19-дюймовые стойки с компьютером, схемой распределения питания, источниками питания и интерфейсом Virginia Panel Corporation (VPC), есть место для установки дополнительных приборов в тракте прохождения сигналов, в за-

висимости от требований тестируемого устройства. На **рисунок 4** показаны основные компоненты базового испытательного оборудования (VTE) в АТЕ, а их функции приведены в таблице 1. Интерфейс VPC используется в качестве механизма связи между приборами для тестирования и тестируемым устройством, позволяя пользователю подключать различные соединительные устройства, например, специализированное испытательное оборудование (STTE), разработанное и изготовленное согласно пользовательским спецификациям (см. **рисунок 5**).



▲ **Рис. 5 Интерфейс VPC для выбора ресурсов из VTE.**



▲ **Рис. 6 Снижение стоимости АТЕ и времени тестирования новых радиолокационных систем.**

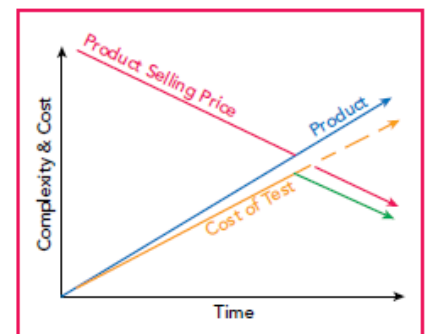
ПРЕИМУЩЕСТВА АТЕ НА ПЛАТФОРМЕННОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАТОРОВ

Создание архитектуры модульной системы АТЕ для испытаний радиолокаторов соответствует нескольким ключевым требованиям, определяемым UUT, что видно на примере радара Giraffe 4A AESA. Реализация модульной системы АТЕ на основе PXI по сравнению с традиционными подходами к радиолокационным испытаниям обеспечивает преимущества по стоимости, времени и стандартизации.

Экономия времени и затрат

Благодаря непрерывной эволюции и расширению новых требований к испытаниям современных радиолокаторов, библиотеки VTE добавляют функциональность и поддержку проверенных драйверов и документирования приборов в АТЕ. Традиционные системы АТЕ требуют дорогостоящей модернизации испытательных лабораторий по мере того, как поколения систем устаревают или перестают соответствовать новым требованиям к испытаниям. Природа открытой архитектуры PXI помогает обеспечить эффективное использование ресурсов и оптимальное повторное использование продуктов и технологий. На **рисунок 6** показано сокращение инженерного труда, отраженное в стоимости и времени, для удовлетворения новым требованиям к испытаниям радаров.

Как показано на **рисунок 7**, продукты становятся все более сложными, а стоимость разработки и тестирования возрастает с ростом сложности. Однако средняя цена реализации снижается, что налагает требования к снижению стоимости тестирования. Чтобы система оставалась прибыльной, стоимость испытаний должна снижаться быстрее снижения стоимости производства. Приняв платформенный подход PXIe, Saab снизила стоимость тестирования и добилась улучшения производительности, масштабируемости и скорости тестирования при уменьшении занимаемой площади и энергопотребления.



▲ **Рис. 7 Зависимость сложности и стоимости от времени для высокотехнологичных продуктов.**

Стандартизация АТЕ

Процесс стандартизации системы АТЕ для радиолокаторов с использованием платформенного подхода обладает преимуществом взаимозаменяемости. Как только становит-

ся доступной новой технологией, можно легко модернизировать старые тестовые системы, отдавая или исключая моральный износ систем. Основанные на платформе PXI системы тестирования радаров содержат взаимодействующие компоненты, которые работают совместно в общей среде программирования и исполнения, например, LabVIEW. Со временем персоналу, который занимается эксплуатацией и поддержкой таких систем, не потребуется специальное обучение, что приводит к экономии средств.

На **рисунке 8** показана взаимосвязь между стратегией тестирования и жизненными циклами продукта. Кривая «Products» показывает количество продуктов, которые пройдут испытания в течение срока службы продукции, а «Test Systems» - общее количество АТЕ. Синим по-

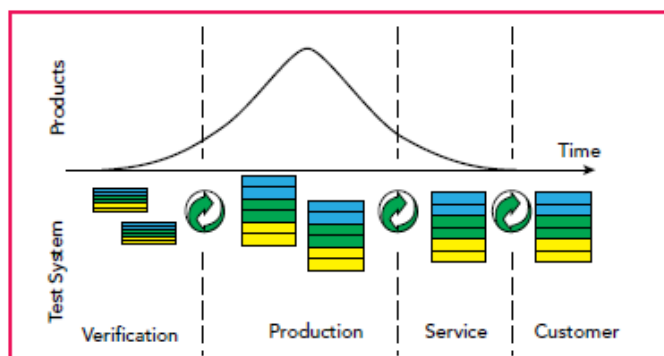
казано программное обеспечение для тестирования, зеленым – аппаратное обеспечение, а желтым – приборы из списка ВТЕ, приведенного в таблице 1. График показывает, что емкость производственной линии можно увеличить более чем в два раза с помощью дополнительного устройства подключения к АТЕ. Стандартизация с использованием PXIe и платформенного подхода в АТЕ устанавливает долгосрочную стратегию тестирования, которая соответствует жизненному циклу продукта.

ВЫВОДЫ

Разработчики радиолокаторов и инженеры-испытатели должны тщательно оценить технические характеристики испытательных приборов при создании системы тестирования радиолокаторов и сделать правиль-

ный выбор для максимизации отдачи от инвестиций. Из-за последних достижений в области многофункциональных радиолокаторов, таких, как AESA, тестовые системы становятся все сложнее и дороже, что обуславливает необходимость в современной модульной системе тестирования радиолокаторов, которая удовлетворяет требованиям к испытаниям, одновременно снижая их стоимость.

Стандартизовав фреймворк АТЕ для радиолокаторов с использованием платформенного подхода NI PXI, Saab удалось значительно сократить инженерные ресурсы, выраженные в деньгах и времени, необходимые для удовлетворения все более сложных требований к испытаниям современных радиолокаторов AESA.



▲ **Рис. 8** Зависимость между стратегией испытаний и этапами жизненного цикла продукта.