

НОВЫЙ ПОДХОД К ТЕСТИРОВАНИЮ КОНВЕРТОРОВ СО ВСТРОЕННЫМ ГЕТЕРОДИНОМ

ДЭВИД БАЛЛО (DAVID BALLO), Agilent Technologies

Обычно векторные анализаторы цепей не используются для измерения групповой задержки аналоговых спутниковых транспондеров, работающих по схеме прямой ретрансляции («прямая дыра»), хотя они и дают существенные преимущества по сравнению с методами, основанными на применении анализаторов спектра. Основная причина этого кроется в отсутствии доступа к ВЧ-тракту или опорным генераторам встроенных в транспондер гетеродинов. Статья описывает новый способ измерения групповой задержки конверторов со встроенным гетеродином с помощью анализаторов цепей Agilent PNA и PNA-X. Этот способ обладает повышенной скоростью измерения и существенно лучшей точностью по сравнению с традиционными методами.

Векторные анализаторы цепей (ВА) позволяют быстро и точно измерять S-параметры различных ВЧ- и СВЧ-устройств. S-параметры составляют основу многих общих измерений, таких как измерение коэффициента усиления, согласования и групповой задержки. И хотя традиционно измерение S-параметров используется для устройств, работающих без преобразования частоты, таких как фильтры, усилители и антенны, в последние годы появились методы измерения S-параметров для устройств, преобразующих частоту, таких как смесители и конверторы. Измерения на смесителях и конверторах выполняются сравнительно просто, если на тестируемое устройство (ТУ) удается подать сигнал внешнего гетеродина или если встроенный гетеродин ТУ и ВА можно синхронизировать от общего опорного генератора. Однако при отсутствии доступа к ВЧ-тракту или опорному генератору встроенного гетеродина измерение групповой задержки ТУ со встроенным гетеродином весьма затруднено.

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВЫХ ТРАНСПОНДЕРОВ

Наиболее характерным типом конверторов со встроенными гетеродинами являются спутниковые транспондеры. Аналоговые спутниковые транспондеры с одним преобразованием применяются уже много лет. Такой транспондер получает сигнал с наземной станции и передает его обратно на землю на другой частоте. Подобная архитектура с одним преобразованием частоты обладает целым рядом преимуществ, и широко применяется по сей день.

Для измерения характеристик транспондеров необходимо выполнить несколько ключевых измерений. Во-первых, нужно убедиться в том, что транспондер обладает достаточным коэффициентом усиления для обратной передачи сигнала на землю. Затем нужно проверить равномерность АЧХ, чтобы убедиться в сохранении формы сигнала во всем диапазоне частот. Линеиность фазы и групповой задержки во всем тракте передачи спутника также очень важна для максимального снижения взаимовлияния сигналов с цифровой модуляцией. Для обеспечения минимальных искажений при подключении транспондера к антенно-фидерной системе нужно измерить согласование портов. И, наконец, важным показателем качества является коэффициент шума, ибо потери сигнала на пути распространения очень велики, поэтому шум, вносимый приемником, надо свести к минимуму.

Дополнительно усложняет ситуацию то, что эти измерения надо выполнять в широком диапазоне условий и режимов. В первую очередь, современные спутниковые транспондеры должны тестироваться в нескольких частотных диапазонах. И поскольку спутник работает в очень жестких условиях космоса, для уверенности в безотказной работе нужно накопить большой объем результатов измерений при разных температурах. И, наконец, для достижения максимальной надежности транспондеры обычно тестируются на разных этапах разработки, начиная с уровня отдельных цепей, затем на уровне модулей и, наконец, на уровне системы. В связи с необходимостью измерения большого

числа параметров в разных условиях тестирование транспондеров отнимает очень много времени и создает большой объем данных.

Дополнительно усложняет работу дороговизна многих измерений. Они выполняются на открытых полигонах, в специальных испытательных отсеках или, что еще сложнее, в климатических вакуумных камерах, которые дороги в эксплуатации и медленно набирают необходимый режим. Когда эти тесты выполняются незадолго до завершения строительства спутника, работа ведется в чрезвычайно напряженном ритме, что вызывает желание как можно скорее закончить проект, чтобы спутник можно было отправить на стартовую площадку и, тем самым, ускорить выплату изготовителю. Это давление естественным образом трансформируется в желание максимально ускорить измерения, чтобы быстрее собрать огромный объем данных, необходимый для подтверждения бесперебойной работы спутника.

ТРАДИЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

Традиционный подход к тестированию аналоговых спутниковых транспондеров довольно прост. С генератора сигналов на спутниковый транспондер подают возбуждающий сигнал на соответствующих частотах, а анализатором спектра измеряют выходной сигнал транспондера.

С помощью источника сигнала, анализатора спектра и направленных ответвителей (см. рис. 1) можно выполнить скалярные измерения коэффициента передачи преобразователя и согласования входа. Для измерения

групповой задержки обычно используется метод задержки огибающей, в котором несущая с АМ или ЧМ пошагово перестраивается по всему диапазону транспондера. Преимущество этого подхода заключается в том, что он не требует когерентности фазы между измерительной системой и тестируемым устройством, в результате чего не нужен доступ к внутренним гетеродинам транспондера.

Однако традиционный метод воздействия/отклика обладает и существенными недостатками. По сравнению с использованием ВА, время измерения значительно увеличивается. Кроме того, страдает точность, поскольку векторная коррекция ошибок, применяемая обычно в ВА, недоступна в комбинации генератор/анализатор спектра. Измерение групповой задержки по методу задержки огибающей склонно давать зашумленные результаты и требует усреднения для повышения отношения сигнал/шум в ущерб скорости измерений.

И, наконец, в традиционной скалярной системе отсутствует информация о векторных величинах. Современные тесты транспондера зачастую требуют измерения параметров S_{11} и S_{22} , что легко выполняется с помощью ВА. Без этих S-параметров нельзя применять современные методы исключения компонентов для устранения влияния кабелей и измерительных адаптеров. Это может стать большой проблемой при отсутствии возможности выполнить калибровку на измерительных портах тестируемого устройства, что зачастую и случается в климатических вакуумных камерах.

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕРТОРОВ С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ВА

Измерение коэффициента передачи преобразователя и векторного согласования входа и выхода конверторов со встроенными гетеродинами сильно упрощается при использовании современных ВА, таких как анализаторы цепей серии Agilent PNA или PNA-X. Эти приборы позволяют независимо настраивать источник воздействующего сигнала и измерительные приемники, для чего используется режим с отстройкой частоты (FOM). Такой подход оказывается значительно быстрее традиционного метода воздействия/отклика, основанного на источнике сигнала и анализаторе спектра. Более высокая скорость по сравнению с приборами, управляемыми компьютером по шине GPIB или по сети, достигается за счет быстрой синхронизации источника сигнала и приемников во время свипирования по частоте. Кроме того, ВА имеет измерительные ответвители,

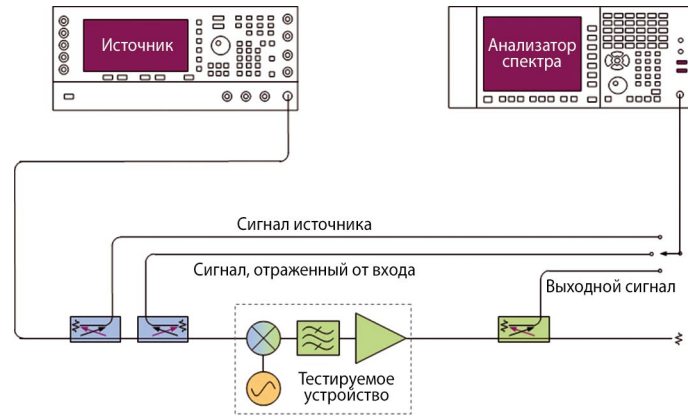


Рис. 1. Традиционный скалярный метод измерения параметров транспондера с помощью генератора сигнала и анализатора спектра с внешними ответвителями и коммутаторами

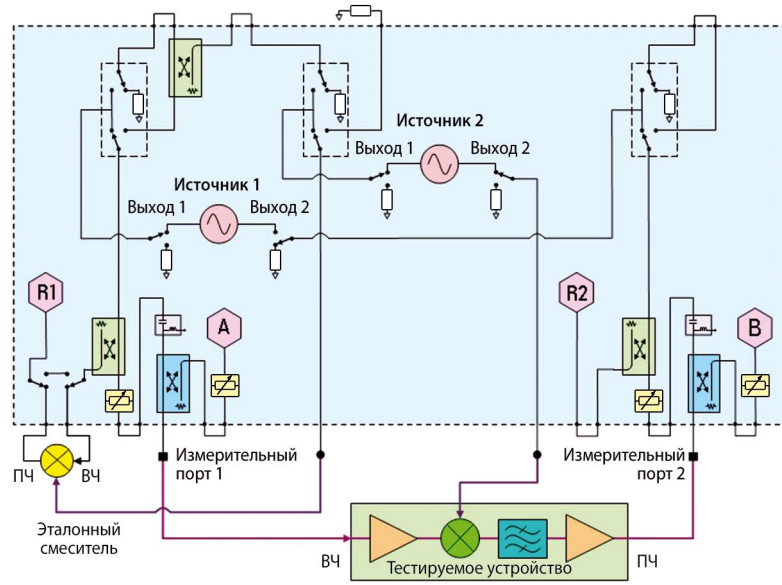


Рис. 2. Для измерения фазы и групповой задержки конверторов с помощью ВА необходим эталонный смеситель, который выдает опорный сигнал той же частоты, что и выходная частота ТУ

которые можно использовать для измерения прямого и обратного сигнала, получая значения параметров S_{11} и S_{22} с высокой точностью за счет векторной коррекции ошибок.

В скалярных измерениях коэффициента передачи преобразователя доступ к гетеродину тестируемого устройства не нужен. Полоса ПЧ анализатора должна быть достаточно широкой, чтобы отстройка от номинальной частоты гетеродина вносила лишь незначительную погрешность. При необходимости значение отстройки можно измерить за одно лишнее свипирование, что позволяет точнее настроить приемники на выходную частоту ТУ и использовать более узкую полосу ПЧ для снижения шумов.

Для измерения фазы передачи (и групповой задержки) в схему измерения надо включить эталонный смеситель, который подает сигнал, имеющий ту же частоту, что и выходной сигнал ТУ, на эталонный приемник ВА. Это позволяет измерить сдвиг фазы между

эталонным и измеряемым сигналом, что дает информацию о зависимости фазы от частоты. Такая информация позволяет легко рассчитать групповую задержку путем дифференцирования по конечной частоте.

На рисунке 2 показан пример применения эталонного смесителя с приборами, подобными PNA-X, для измерения конверторов без встроенных гетеродинов. Эталонный смеситель включается в тракт эталонного приемника с помощью соответствующих разъемов на передней панели, которые имеются у большинства современных ВА. PNA-X позволяет упростить схему тестирования за счет опционального встроенного второго источника сигнала, выдающего сигналы гетеродина. Такая схема работает очень быстро, поскольку два источника и приемники синхронизируются аппаратными и программными средствами ВА.

Давайте представим, как расширить эту схему измерения на устройства со встроенными гетеродинами. Возможны

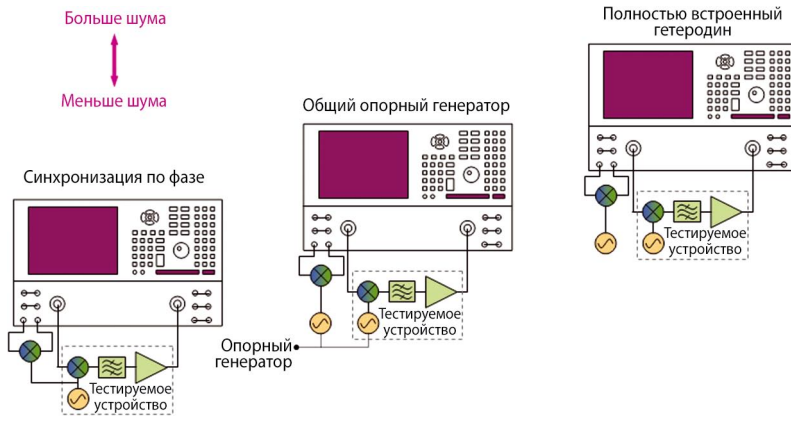


Рис. 3. Шум групповой задержки зависит от конструкции гетеродина. Для обычного гетеродина шум минимален. Два гетеродина с общим опорным генератором дают промежуточный уровень шума. Труднее всего выполнять измерения с полностью встроенным гетеродином

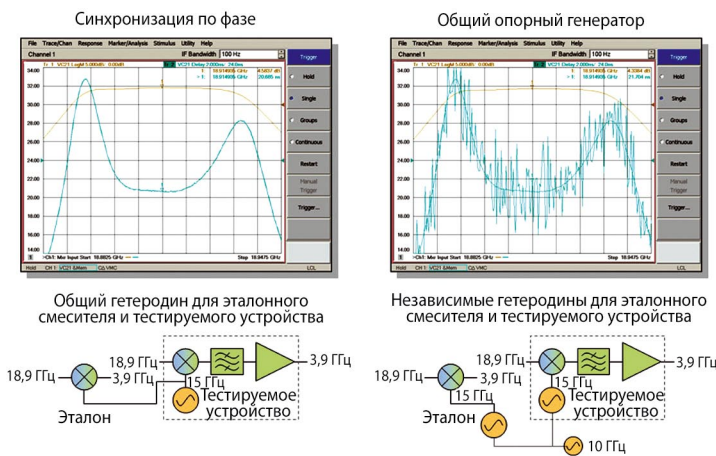


Рис. 4. Сравнение шума конфигураций с общим гетеродином и с общим опорным генератором

три варианта, каждый из которых характеризуется своим уровнем шумов (а, следовательно, точностью), источником которых является фазовый шум гетеродинов (см. рис. 3). Лучшим вариантом является метод с «синхронной фазой» или с общим гетеродином. В этой схеме имеется прямой доступ к внутреннему гетеродину, поэтому его сигнал можно подать на эталонный смеситель. Следующим вариантом является схема, в которой сам гетеродин недоступен, но имеется доступ к его опорному генератору, который можно синхронизировать с опорным генератором гетеродина эталонного смесителя. Самым сложным является случай полностью встроенного гетеродина, который и встречается в большинстве транспондеров.

Вариант с общим гетеродином дает минимальный шум задержки, поскольку фазовый шум гетеродина присутствует и на эталонном (R1), и на измерительном приемнике (B). Поскольку измеряется разность фаз между этими двумя приемниками, фазовый шум гетеродина компенсируется. При измерении ТУ со встроенным гетеродином и доступом к опорному генератору эта-

лонный смеситель и ТУ используют разные гетеродины, синхронизированные с общим опорным генератором (например, 10 МГц). Это значит, что их средняя частота совпадает, но флуктуации фазы, вызванные собственным фазовым шумом, будут различаться. Оба гетеродина будут когерентны по частоте, но не синхронны по фазе. Поскольку сигналы эталонного и измерительного приемников поступают от разных гетеродинов, их фазовый шум не компенсируется при измерении разности фаз между приемниками R1 и B, в отличие от случая с синхронной фазой. Это приводит к повышению шума задержки, как показано на рисунке 4.

К счастью, существуют три способа снижения шума в несинхронных по фазе измерениях задержки. Если гетеродин ТУ, гетеродин смесителя и гетеродин ВА синхронизированы от общего опорного генератора, то сужение полосы ПЧ приводит к снижению шума в связи с уменьшением общего отношения сигнал/шум. Другим широко распространенным средством является усреднение. Но и сужение полосы ПЧ, и усреднение увеличивают время измерения. Третий способ снижения

шума использует функцию сглаживания. В этом случае к кривой применяется фильтр скользящего среднего. Сглаживание не замедляет измерений. Обычно для достижения баланса между скоростью и точностью измерений применяют все три метода в некоторой комбинации, которую определяет пользователь.

Наиболее сложным является случай со встроенным гетеродином при отсутствии доступа к гетеродину ТУ или его опорному генератору. Такая ситуация наиболее типична для спутниковых транспондеров, поскольку ограничения, накладываемые на размер и массу таких транспондеров, а также необходимость защиты от помех исключают простой доступ к гетеродинам на борту спутника. В такой ситуации не удастся подключиться к гетеродину для обеспечения когерентной синхронизации между ВА и транспондером. Именно поэтому ВА раньше не использовались для таких измерений, что сильно препятствовало повышению скорости измерений характеристик транспондера. Тем не менее, компания Agilent предложила метод, позволяющий обойти эту проблему. Этот новый подход обеспечивает стабильность частоты и фазы, позволяя выполнять калиброванные измерения фазы и групповой задержки.

ДОСТИЖЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПО ЧАСТОТЕ

Для измерения фазы и групповой задержки источник сигнала гетеродина для эталонного смесителя должен генерировать сигнал с частотой, соответствующей выходной частоте транспондера. Частота гетеродина эталонного смесителя должна быть достаточно близка к частоте гетеродина ТУ, чтобы относительный дрейф фазы за время измерения был невелик. Если эти частоты будут близки, два сигнала ПЧ будут выглядеть когерентными достаточно долго, чтобы можно было выполнить достоверные фазовые измерения. Эти условия называют псевдокогерентной синхронизацией частоты. С учетом того, что в спутниковых транспондерах обычно используются стабильные источники сигнала, они позволяют выполнять измерения групповой задержки, на которых не сильно сказывается отсутствие общего физического подключения к гетеродину.

Для обеспечения соответствующей псевдокогерентной синхронизации между ТУ и измерительными приборами PNA-X (или PNA) разделяет измерение гетеродина транспондера на два измерения — грубое и точное. Такой двухэтапный подход обеспечивает необходимую точность частоты за короткое время. В процессе грубой

настройки на ТУ подается фиксированный ВЧ-сигнал, а приемник PNA-X выполняет свипирование в области предполагаемой выходной частоты. Разность частот между реальным и ожидаемым сигналом (полученная на основе номинального значения частоты гетеродина ТУ) дает смещение частоты, которое можно использовать для максимально точной настройки гетеродина смесителя на частоту гетеродина ТУ.

Но одно лишь грубое свипирование не обеспечивает необходимой точности оценки частоты гетеродина ТУ для предотвращения расхождения фазы между ТУ и PNA-X. Требуемую точность частоты можно получить с помощью другого метода, который используется для тонкого свипирования. После грубой подстройки сигнала гетеродина, подаваемого на эталонный смеситель, PNA-X измеряет зависимость разности фаз эталонного и измерительного приемника от времени при фиксированной входной частоте и при фиксированной настройке приемников на грубую выходную частоту ТУ. Любое малое остаточное смещение частоты будет проявляться в виде линейного изменения фазы по времени. Наклон этой зависимости можно точно оценить, что дает значение смещения для тонкой оценки.

После настройки гетеродина эталонного смесителя в соответствии с тонким значением смещения процесс тонкой настройки можно повторить несколько раз для получения хорошей, субгерцовой оценки частоты гетеродина ТУ. Снижение зависимости сдвига фазы от времени до получения горизонтальной характеристики за период измерения позволяет создать условия псевдосинхронизации и зафиксировать сдвиг фаз между двумя генераторами. Этот метод значительно быстрее метода узкополосного свипирования приемников PNA с большим числом измерительных точек. Грубая и точная настройка могут выполняться в каждой точке измерения групповой задержки. Это обеспечивает когерентную зависимость между измерительным прибором и тестируемым устройством.

ДОСТИЖЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПО ФАЗЕ

Даже после достижения псевдокогерентности по частоте будут наблюдаться флуктуации абсолютной фазы от свипирования к свипированию из-за особенностей синтеза сигнала в анализаторах серии PNA. Однако фазу каждого свипирования можно нормализовать в некоторой точке кривой, а значит, можно будет использовать столь же эффективное усреднение, как и в слу-

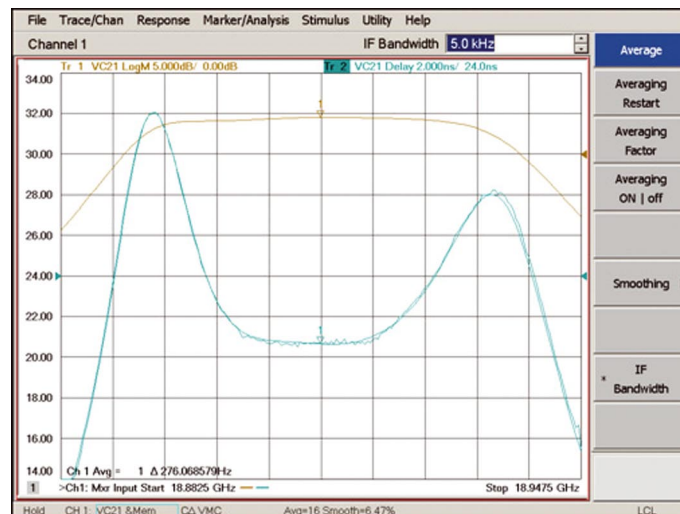


Рис. 5. Результаты измерения задержки в конфигурации со встроенным гетеродином, наложенные на результаты измерения в конфигурации с общим гетеродином. Заметно небольшое увеличение шума

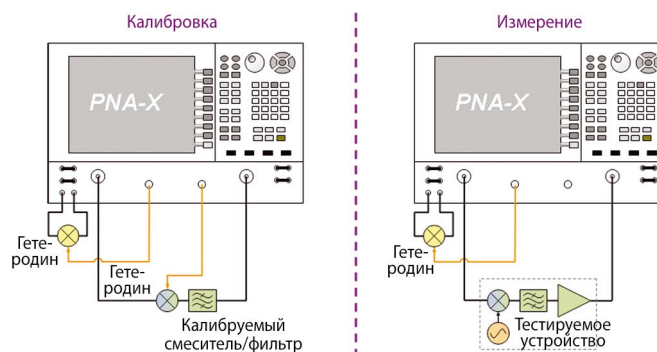


Рис. 6. Для калибровки использовался метод векторной калибровки смесителя (ВКС) компании Agilent. Во время измерения сигнал гетеродина, подававшийся на калибруемый смеситель, не использовался

чае общего гетеродина или общего опорного генератора.

ВЫБОР ПОЛОСЫ ПЧ

Выбор полосы ПЧ в случае со встроенным гетеродином — далеко не очевидная вещь. Обычно для улучшения отношения сигнал/шум полосу ПЧ сужают. Однако в связи с тем, что между измерительным прибором и ТУ установлена не истинная синхронизация по частоте, а псевдокогерентная синхронизация, нестабильность частоты измеряемого сигнала может оказаться достаточно большой, чтобы узкая полоса ПЧ привела к значительной ошибке измерения групповой задержки. В такой ситуации более стабильных результатов можно добиться, расширяя полосу ПЧ. Оптимальная полоса ПЧ обычно определяется эмпирически.

Как уже упоминалось, применение независимых гетеродинов повышает шум групповой задержки из-за невозможности скомпенсировать фазовый шум гетеродина. Однако для получения приемлемых результатов для устройств со встроенным гетеродином можно использовать сглаживание

и усреднение, так как это делается в случае с общим опорным генератором. На рисунке 5 видно, что результаты измерения встроенного гетеродина со сглаживанием и усреднением, хотя и имеют немного больший шум, практически совпадают с результатами, полученными в конфигурации с общим гетеродином.

СКОРОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

Как уже упоминалось, измерение групповой задержки с помощью ВА выполняется значительно быстрее, чем традиционное пошаговое измерение с помощью источника сигнала и анализатора спектра. Измерение характеристик устройства со встроенным гетеродином по 201 измерительной точке занимает при этом менее одной секунды. Если предположить, что используется 10 усреднений, это даст примерно 9 с на измерение. Для выполнения такого же измерения по методу модулированной несущей (задержки огибающей) обычно требуется несколько минут. Если добавить к этому время на измерение коэффициента передачи преобразователя и качества согласования, то измерительные системы на основе ВА

могут дать выигрыш по времени более чем в 100 раз.

КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Компания Agilent предлагает два метода калибровки, предназначенные специально для измерения параметров смесителей и конверторов. Скалярная калибровка смесителя (СКС) представляет собой метод, основанный на применении измерителя мощности, который обеспечивает максимальную точность измерения потерь преобразования и коэффициента передачи преобразователя. СКС компенсирует расхождение ТУ во время измерения прямого сигнала, существенно снижая помехи, вызванные рассогласованием. Кроме того, СКС можно использовать для измерения входного и выходного согласования ТУ как по амплитуде, так и по фазе.

Векторная калибровка смесителя (ВКС) обеспечивает максимальную точность измерения фазы и абсолютной групповой задержки. В качестве калибровочного эталона ВКС использует смеситель с известными характеристиками и обычные эталоны отражения. ВКС устраняет ошибку по амплитуде и фазе в измерениях как прямого, так и отраженного сигнала. При выполнении ВКС PNA-X подает сигналы гетеродина и на эталонный, и на калибруемый смеситель (см. рис. 6). Это значит, что схема измерения синхронна по частоте, что обеспечивает чистую калибровку. Альтернативно, при использовании модели PNA, в качестве общего сигнала гетеродина можно использовать внешний генератор. При измерении ТУ со встроенным гетеродином PNA-X (или внешний генератор сигнала) также

подает сигнал гетеродина на эталонный смеситель, а ТУ использует свой встроенный гетеродин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение анализаторов цепей Agilent PNA или PNA-X для тестирования конверторов с встроенными гетеродинами дает выигрыш как по скорости, так и по точности, по сравнению с традиционным скалярным методом «воздействия/отклика», использующим генератор сигналов и анализатор спектра. Решение на основе ВА поможет разгрузить дорогостоящие испытательные камеры, сократить время изготовления и минимизировать стоимость проекта.

Демонстрацию измерения характеристик устройства с встроенным гетеродином с помощью PNA-X можно посмотреть в интернете по адресу wireless.agilent.com/vcentral/viewvideo.aspx?vid=453.

СОБЫТИЯ РЫНКА

| HP И FOXCONN ЗАПУСТИЛИ СОВМЕСТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО В РОССИИ | Чуть меньше двух лет назад под Петербургом началось строительство завода, где Foxconn и Hewlett Packard планировали развернуть производство компьютеров под брендом HP. По графику, завод должен был заработать во II кв. 2009 г., выпуская до 40 тыс. настольных ПК в месяц. Только первая очередь застройки должна была занять площадь 32 тыс. кв.м, затем планировалось добавить к ней еще 20 тыс. На это производство Foxconn и HP обещали потратить 50 млн долл.

Однако поздней осенью 2009 г. прошла информация, что проект заморожен на неопределенный срок. Казалось бы, на идею можно было поставить крест, но внезапно дело сдвинулось с мертвой точки, и 28-го апреля этого года в поселке Шушары, относящемуся к Пушкинскому району С.-Петербурга, запустили совместное производство персональных компьютеров HP.

На пресс-конференции перед торжественной церемонией запуска присутствовал Джим Чанг (Jim Chang), исполнительный вице-президент Foxconn Technology Group. Мероприятие посетил и другой участник большой закладки — вице-губернатор С.-Петербурга Михаил Осеевский.

Главным спикером от Hewlett Packard стал Эрик Кадор (Eric Cador), ст. вице-президент Группы персональных систем HP в EMEA. Также за столом присутствовали генеральный директор «ФоксCONN РУС» Андрей Коржаков и Бенуа Фагар (Benoit Fagart), вице-президент Группы персональных систем HP в EMEA по управлению цепочками поставок.

Сложилось ощущение, что уважаемые гости соревнуются между собой в том, кто даст самый благожелательный, но в то же время уклончивый ответ. В чуть менее официальной обстановке Андрей Коржаков сказал, что пошлины на готовые компьютеры очень высоки, тогда как на комплектующие они ниже, а на ряд категорий и вовсе отсутствуют. Поэтому размещение сборочного цеха в России — способ существенно снизить себестоимость готовых компьютеров.

Еще один представитель организаторов заметил, что все чаще без наклейки «Сделано в России» к тендерам попросту не допускают. Соответственно, для успешной продажи компьютеров государственным учреждениям HP была вынуждена организовать производство в России.

На церемонии официального запуска производства прибыла губернатор С.-Петербурга Валентина Матвиенко. По ее словам, завод Foxconn и HP представляет собой «первый объект кластера высоких технологий», создаваемый в С.-Петербурге.

После торжественной части журналистов провели вдоль производственной линии. Пока на совместном производстве планируют выпускать только настольные компьютеры, причем самые простые — семейства HP Compaq. Выяснилось, что в комплектацию этих ПК входит процессор Intel Pentium E5400, жесткий диск на 320 Гбайт и 2 Гбайт ОЗУ. Разумеется, использование дискретных видеоадаптеров не предусмотрено, т.к. применяется встроенное решение. При всей симпатии к HP и Foxconn такую конфигурацию нельзя назвать высокотехнологичной. Но в школах и госучреждениях ей, конечно же, будут рады.

От события осталось двойственное ощущение. С одной стороны, действительно хорошо, что такие гиганты как Foxconn и Hewlett Packard начали собирать компьютеры в России. Возможно, их опыт позволит другим IT-компаниям заниматься в нашей стране не только торговлей, но и производством.

В то же время обидно, что на исходе первого десятилетия XXI в. открытие линии по сборке пусть и породистых, но очень простых компьютеров считается у нас событием, достойным участия в нем руководителя второго по величине города страны.

www.russianelectronics.ru