Линейка отечественных анализаторов спектра «СК4-БЕЛАН 140/240/280/400» до 40 ГГц

Сергей БЕЛЬЧИКОВ, к. т. н.
Анатолий БЕЛЬЧИКОВ, д. т. н.
Андрей ДЗИСЯК, к. т. н.

В статье рассматривается линейка отечественных анализаторов спектра до 40 ГГц. Раскрыты ключевые особенности их архитектуры. Дается анализ основных технических характеристик в сравнении с лучшими в отрасли современными аналогами.

Введение

Приемно-анализирующая контрольно-измерительная аппаратура СВЧ-диапазона — один из фундаментальных элементов метрологического обеспечения в радиоэлектронной, аэрокосмической и оборонной промышленности: без нее невозможно проектирование и тестирование различных систем связи, радионавигации, радиоэлектронной борьбы и радиолокации. Ключевым прибором приемно-анализирующей КИА (контрольно-измерительной аппаратуры) СВЧ-диапазона является анализатор спектра. Сегодня наиболее востребованным с точки зрения спектрального анализа можно считать частотный диапазон от 9 кГц до 40 ГГц. За рубежом анализаторы спектра, работающие в этом диапазоне частот, производятся только в трех странах:

- США (компания Agilent);
- Германии (компания Rohde & Schwarz);
- Японии (компания Anritsu).

В России на момент публикации единственным производителем, который освоил серийное производство моноблочных анализаторов спектра класса СК4 с диапазоном до 40 ГГц, является ЗАО ПФ «ЭЛВИРА».

ПФ «ЭЛВИРА», частное предприятие, основанное в 1993 году, упорно развивает направление, связанное с разработкой и производством современных измерительных приборов, финансируя его исключительно за счет собственных средств. На начальном

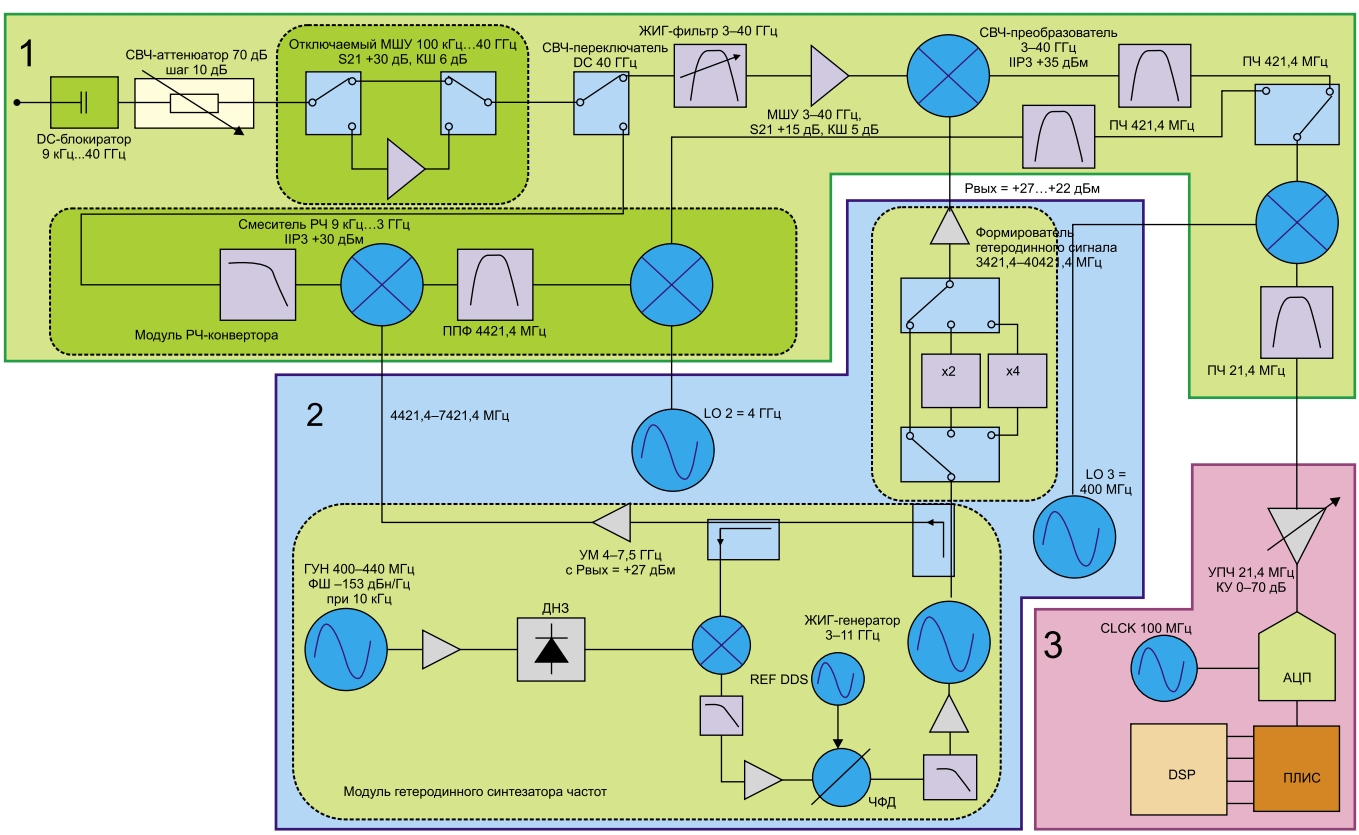


Рис. 1. Упрощенная блок-схема анализатора спектра СК4-БЕЛАН 400

этапе, в 1998 году, в ПФ «ЭЛВИРА» была поставлена задача на современной компонентной базе разработать экономичный анализатор спектра, не уступающий импортным аналогам. За почти полтора десятилетия напряженной работы — период времени, в течение которого на российский рынок было поставлено свыше 500 анализаторов спектра разных моделей — общий технический уровень выпускаемых приборов значительно вырос: теперь они могут успешно выдерживать сравнение с лучшими зарубежными аналогами.

В современном анализаторе спектра есть ряд параметров, которыми определяется общий метрологический класс прибора:

- частотный диапазон;
- частотное разрешение и полоса анализа;
- чувствительность и динамические характеристики;
- точность измерения частотных и амплитудных характеристик;
- скорость.

Совокупность этих характеристик позволяет судить о том, превосходит ли один прибор другой или же уступает ему. Ниже мы рассмотрим указанные параметры подробнее и сравним по каждому из этих критериев СВЧ-анализаторы спектра СК4-БЕЛАН 140/240/280/400 с лучшими зарубежными аналогами. Говоря об определенном параметре анализатора спектра, важно понимать, что он, как правило, напрямую зависит от соответствующего аппаратного узла (или нескольких узлов), поэтому рассмотрение специфики аппаратной реализации таких узлов может оказаться неотъемлемой частью сравнительного анализа конкурентных моделей. Если аппаратную архитектуру анализатора спектра рассматривать в упрощенном виде, то целесообразно выделить три укрупненных ключевых блока (рис. 1):

- тракт преобразования СВЧ-сигнала в сигнал промежуточной частоты;
- систему синтеза сигнала гетеродинов;
- блок цифровой обработки и визуализации результатов измерений.

В дальнейшем мы расскажем, как те или иные элементы этих блоков влияют на основные параметры спектроанализатора, улучшая их или выступая в качестве системного ограничения.

Частотный диапазон

Частотный диапазон анализатора спектра определяется частотными свойствами тракта преобразования и частотными свойствами системы синтеза. Тракт преобразования современного анализатора спектра, как правило, состоит из двух каналов, или поддиапазонов: первый (РЧ-диапазон) обычно работает от единиц килогерц до 3–4 ГГц (гетеродин настроен выше радиочастоты на значение промежуточной частоты (ПЧ), которое может достигать нескольких ги-

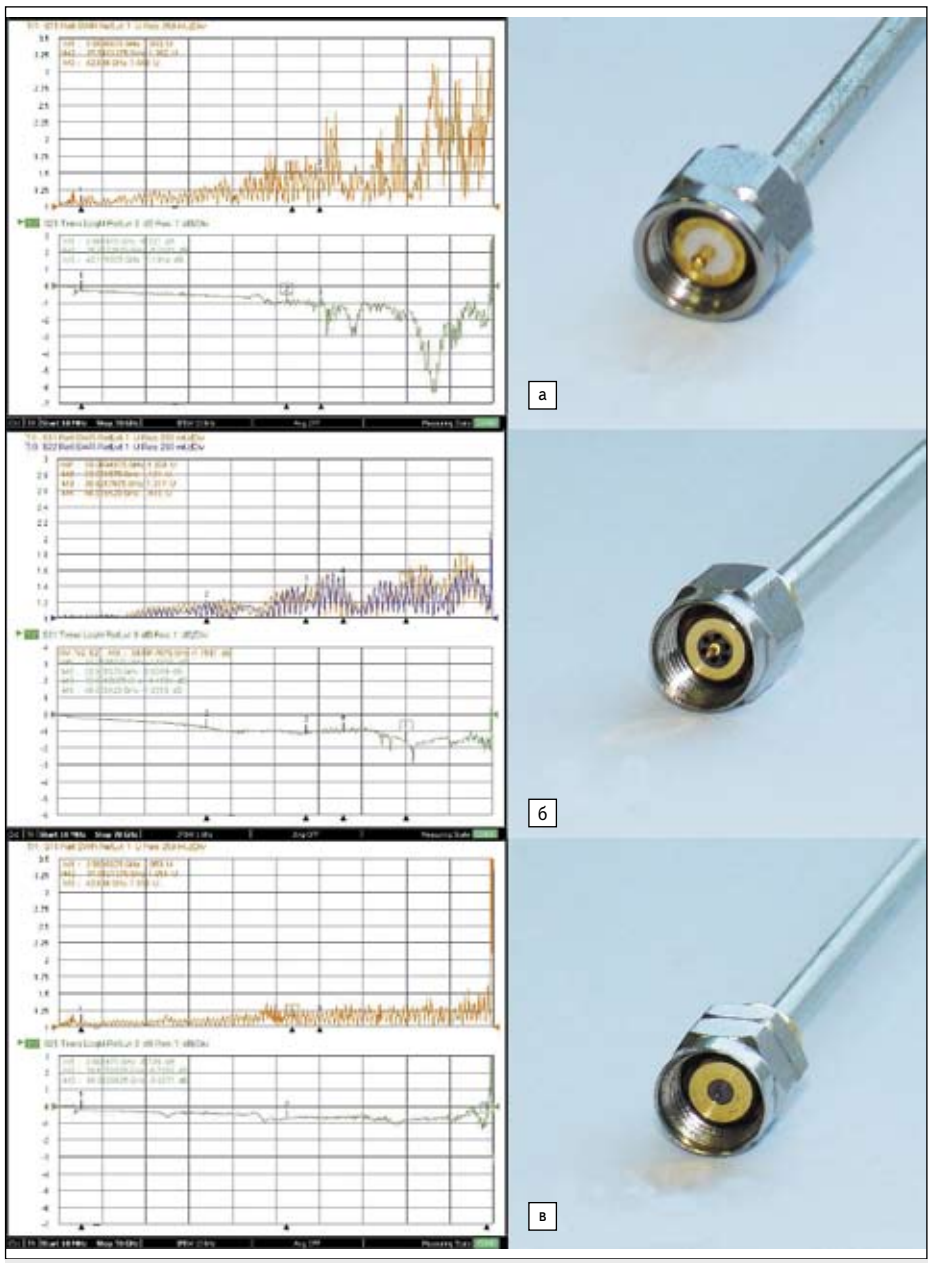


Рис. 2. Вносимые потери и КСВ типовой кабельной сборки длиной 20 см производства ПФ «ЭЛВИРА» с разъемами: а) 2,92 мм; б) 2,4 мм; в) 1,85 мм

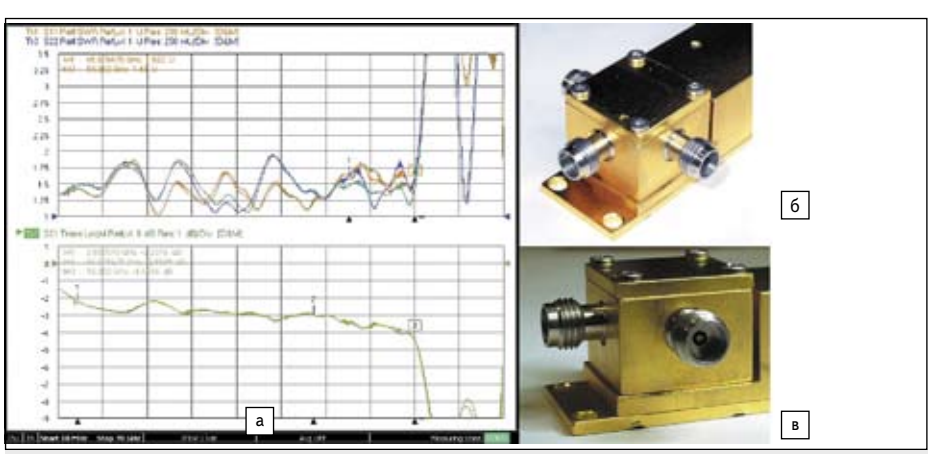


Рис. 3. а) Вносимые потери и КСВ портов входного переключателя каналов СК4-БЕЛАН 400; б, в) внешний вид узла

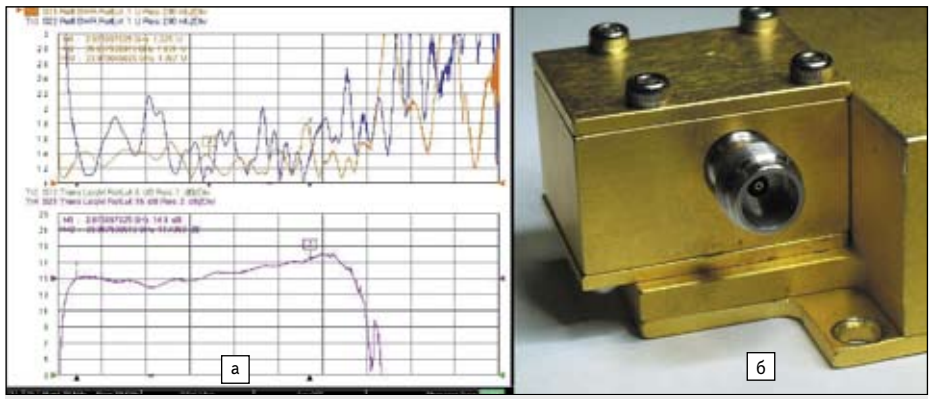
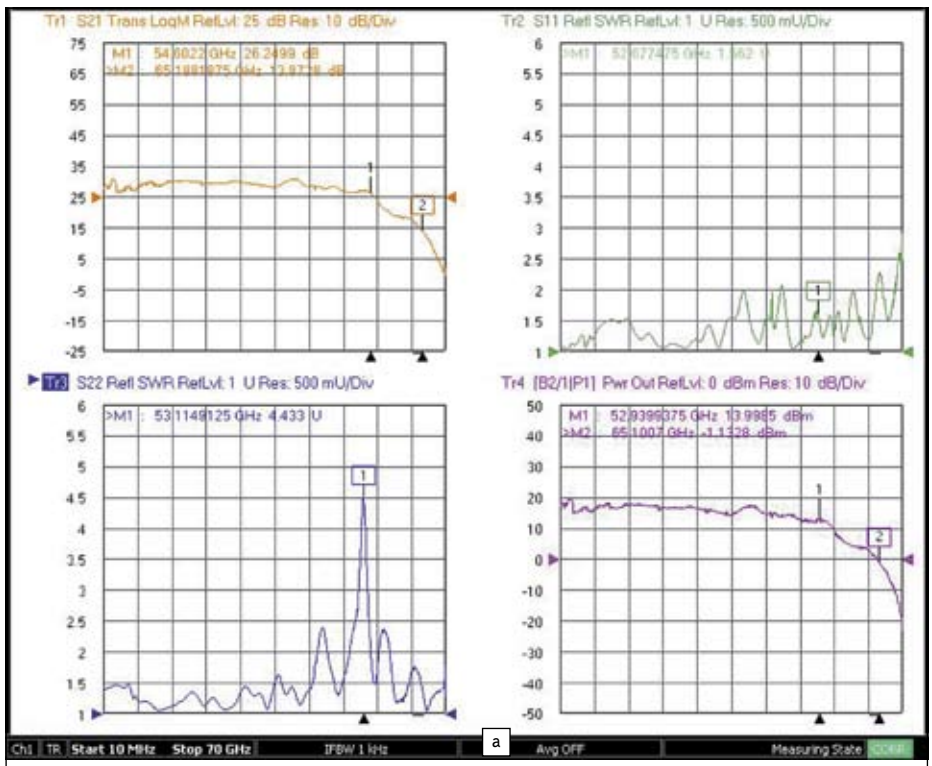


Рис. 4. а) Измеренные значения коэффициента усиления, КСВ входа/выхода базового МШУ 3–40 ГГц;
б) внешний вид модуля



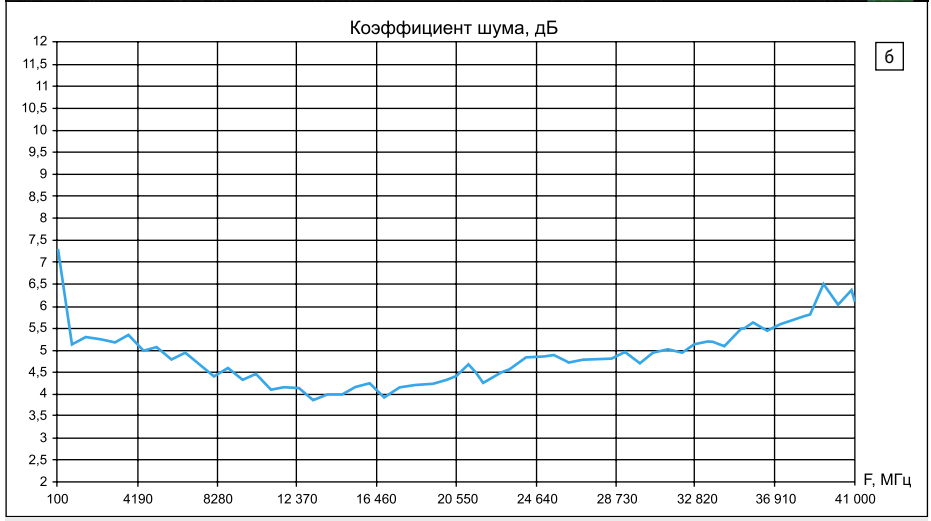


Рис. 5. Измеренные значения опционального СВЧ МШУ 100 кГц – 40 ГГц:
а) коэффициента усиления, выходной мощности при зондировании ВАЦ –10 дБм, КСВ входа/выхода;
б) коэффициент шума

гагерц); во втором поддиапазоне (СВЧ-диапазон) значения частоты принимаемого сигнала и гетеродина разнесены всего лишь на несколько сотен мегагерц, а зеркальный канал подавляется при помощи перестраиваемого фильтра на железо-иттриевом гранате (ЖИГ-фильтра). Этот архитектурный принцип, помимо частотных свойств, касается также ряда других параметров прибора, о чем будет сказано ниже.

Очевидно, что основные элементы, входящие в состав тракта и оконечного формирователя системы синтеза, должны работать во всей заявленной полосе частот, то есть до 40 ГГц. Широкополосные свойства прибора начинаются с качественных соединителей. Во флагманской модели СК4-БЕЛАН 400 ПФ «ЭЛВИРА» в корпусированных СВЧ-узлах и в межузловых кабельных сборках используются высококачественные соединители K-типа (2,92 мм), 2,4 мм (спецзаказ) или V-типа (1,85 мм, спецзаказ), которые гарантированно работают выше 40 ГГц. На рис. 2 показаны вносимые потери и КСВ (коэффициент стоячей волны) типовой кабельной сборки производства ПФ «ЭЛВИРА» длиной 20 см с разъемами 2,92, 2,4 и 1,85 мм.

Качественные СВЧ-соединители, а также использование современных монолитных интегральных схем (МИС) в сочетании с прецизионной разваркой ультразвуком позволили добиться частотных параметров основных узлов (переключатели, усилители, смесители) на уровне лучших аналогов в отрасли. На рис. 3 приведены типовые параметры входного переключателя каналов СК4-БЕЛАН 400.

На рис. 4 приведены типовые параметры СВЧ-усилителя, который штатно стоит в СВЧ-канале 3–40 ГГц после ЖИГ-фильтра для оптимизации чувствительности прибора на частотах выше 20 ГГц. На рис. 5 даны типовые параметры СВЧ малошумящего усилителя (МШУ), который устанавливается в прибор в качестве опции и используется при измерениях коэффициента шума активных устройств.

На рис. 6 приведены типовые параметры коэффициента передачи связки МШУ + СВЧ-конвертер, которая преобразует входной СВЧ-сигнал на частоту ПЧ 421,4 МГц. Графиками разных цветов показаны три поддиапазона СВЧ-канала 3–40 ГГц:

- Диапазон 3–10 ГГц, где гетеродин прибора работает без умножения.
- Диапазон 10–20 ГГц, где гетеродин прибора работает с умножением на 2.
- Диапазон 10–40 ГГц, где гетеродин прибора умножается на 4.

Важно, что сигналы гетеродинов после умножения фильтруются и усиливаются до нужного уровня, что позволяет преобразователям частоты работать по основному колебанию (а не по гармоникам) и поддерживать равномерный коэффициент передачи

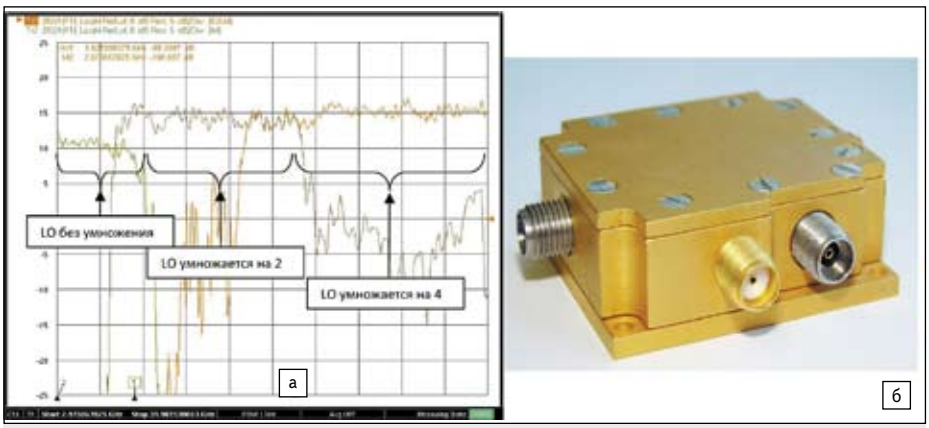


Рис. 6. а) Коэффициент передачи СВЧ-конвертера СК4-БЕЛАН 400; б) внешний вид устройства без платы питания

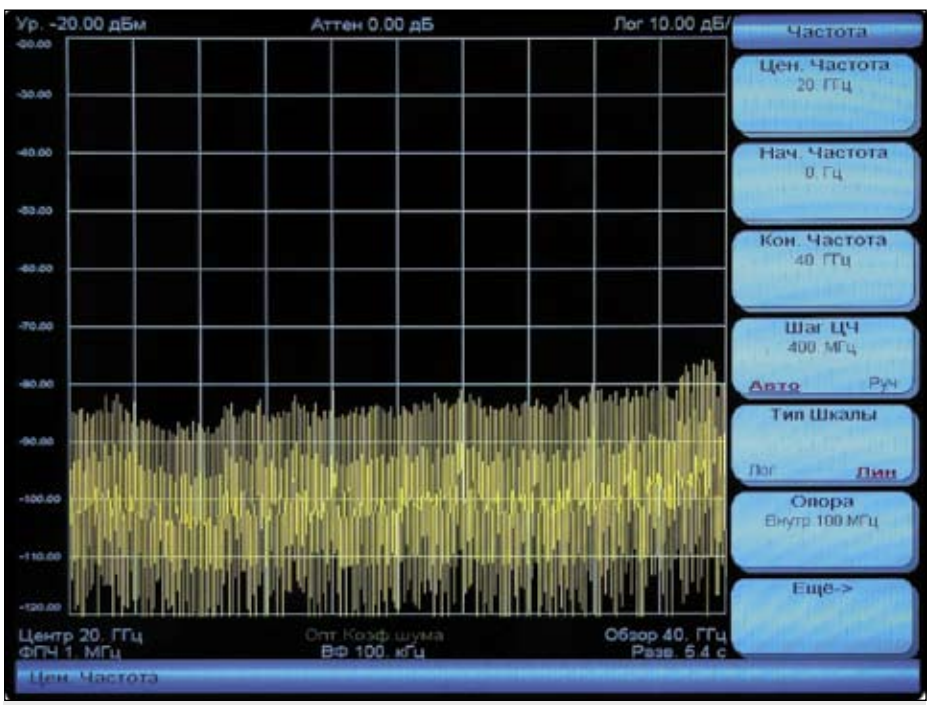


Рис. 7. Средний уровень собственных шумов СК4-БЕЛАН 400 после калибровки

во всей полосе частот. Три наложенных графика отражают «сырую» частотную неравномерность СВЧ-тракта прибора в диапазоне от 3 до 40 ГГц. Характерно, что с ростом частоты коэффициент передачи только возрастает, это означает, что прибор на более высоких частотах (20–40 ГГц) будет иметь чувствительность такую же, как и на частотах более низких (9 кГц…20 ГГц). График среднего уровня шумов откалиброванного прибора СК4-БЕЛАН 400 (рис. 7) это полностью подтверждает.

Таблица 1. Таблица анализаторов спектра, работающих в диапазоне частот до 40 ГГц

Название прибора	Производитель	Частотный диапазон
PSA E4447A	Agilent, США	3 Гц...42,98 ГГц
PXA N9030A-543	Agilent, США	3 Гц...43 ГГц
8564EC	Agilent, США	9 кГц...40 ГГц
Rohde & Schwarz FSU43	Rohde & Schwarz, Германия	20 Гц...43 ГГц
Rohde & Schwarz FSQ40	Rohde & Schwarz, Германия	20 Гц...40 ГГц
Rohde & Schwarz FSV40	Rohde & Schwarz, Германия	9 кГц...40 ГГц
Anritsu MS2830A-045	Anritsu, Япония	9 кГц...43 ГГц
СК4-БЕЛАН 400	ЗАО ПФ «ЭЛВИРА», Россия	9 кГц...40 ГГц (опционально 10 Гц...45 ГГц)

Разрешение и полоса анализа

Разрешение по ПЧ (англ. resolution bandwidth, RBW) и полоса анализа — это важнейшие свойства анализатора спектра, которые относятся к блоку цифровой обработки (блок 3 на рис. 1). Минимальное разрешение по ПЧ или минимальная полоса пропускания позволяют судить о том, на каком минимальном расстоянии по оси частот анализатор спектра может разделить два сигнала. Когда говорится, что минимальный фильтр ПЧ у анализатора спектра равен 1 Гц по уровню –3 дБ, это означает, что прибор может уверенно разделить два сигнала, частота которых отличается на 1 Гц. Максимальная полоса анализа позволяет осуществлять анализ и векторную демодуляцию широкополосного сигнала. Следует понимать, что при векторной демодуляции анализатор спектра настроен на определенную частоту и его гетеродин не перестраивается. То есть максимальный фильтр ПЧ, который может использоваться для развертки, и максимальная полоса анализа — это не одно и то же. Для различных широкополосных сигналов требуется разная максимальная полоса анализа:

- 5 МГц для W-CDMA;
- 8 МГц для сигнала DVB-T;
- 20 МГц для систем LTE и т. д.

Класс анализатора спектра тем выше, чем шире максимальная полоса анализа, и, с другой стороны, чем у́же минимальный фильтр ПЧ. Полосу пропускания можно устанавливать в анализаторе спектра с кратностью шага 1, 3, 10 или 1, 2, 3, 5, 10, или же с шагом 10%. Десять лет назад наличие минимального фильтра в 1 Гц было очень серьезным достижением, однако сегодня, за счет применения цифровой обработки сигнала и цифровой фильтрации, реализовать фильтр 1 Гц стало гораздо проще, поэтому сейчас все анализаторы спектра высокого уровня стандартно имеют минимальную полосу пропускания 1 Гц.

Иным образом обстоят дела с максимальной полосой анализа: если еще 5 лет назад максимальной полосы в 3 МГц было вполне достаточно, то сейчас, в свете быстрого развития современных систем беспроводной связи, 10 МГц — это обязательный минимум, а в некоторых случаях могут требоваться полосы шире, чем 150 МГц. При этом важно понимать, что подобные полосы анализа нужно реализовывать при минимальном вертикальном разрешении АЦП не хуже 12 бит (желательно не хуже 14 бит), в противном случае с точки зрения динамики анализатор спектра будет не лучше осциллографа с одинаковой полосой и наличием БПФ.

Для примера, 14-битный АЦП обеспечит аппаратную односигнальную динамику без дополнительной фильтрации и математической обработки в 84,28 дБ, а 16-битный, соответственно, в 96,32 дБ.

Широкие полосы анализа (выше 20 МГц) требуют установки в СВЧ-анализатор спектра дополнительных аппаратных переключателей, которые позволяют при необходимости исключить из тракта ЖИГ-фильтр, который имеет типичную полосу пропускания 25 МГц и, соответственно, может стать системным ограничением для анализа широкополосных сигналов. Для некоторых приложений (например, исследования ЭМС и ПЭМИН) требуется наличие в анализаторе спектра специализированных полос пропускания, нормируемых по уровню –6 дБ: 200 Гц, 9 кГц, 120 кГц и 1 МГц (стандарт CISPR-16-1). Такие

Таблица 2. Сравнение лучших современных анализаторов спектра на 40 ГГц относительно полосы анализа

Название прибора	Набор фильтров ПЧ (используются при развертке)	Наличие фильтров для ЭМС (CISPR-16-1)	Штатная полоса векторной демодуляции (вертикальное разрешение)	Опциональная максимальная полоса векторной демодуляции (вертикальное разрешение)
PSA E4447A	1 Гц...8 МГц с шагом 10%	Опция	8 МГц (14 бит)	80 МГц (14 бит)
PXA N9030A-543	1 Гц...8 МГц с шагом 10%	Опция	10 МГц (16 бит)	160 МГц (14 бит)
8564EC	1 Гц...1 МГц с кратностью шага 1, 3, 10, плюс 2 МГц	Нет	3 МГц (аналоговый фильтр, демодуляция отсутствует)	3 МГц (аналоговый фильтр, демодуляция отсутствует)
Rohde & Schwarz FSU43	1 Гц...20 МГц с кратностью шага 1, 2, 3, 5, 10, плюс 50 МГц	Стандарт	8 МГц (14 бит)	8 МГц (14 бит)
Rohde & Schwarz FSQ40	1 Гц...20 МГц с кратностью шага 1, 2, 3, 5, 10, плюс 50 МГц	Стандарт	28 МГц (14 бит)	120 МГц (14 бит)
Rohde & Schwarz FSV40	1 Гц... 20 МГц с кратностью шага 1, 2, 3, 5, 10	Стандарт	28 МГц (16 бит)	40 МГц (16 бит)
Anritsu MS2830A-045	1 Гц...3 МГц с кратностью шага 1, 3, 10 плюс 5 МГц	Опция	5 МГц (16 бит)	31,25 МГц (16 бит)
СК4-БЕЛАН 400	1 Гц...3 МГц с кратностью шага 1, 3, 10 (1 Гц...10 МГц с кратностью шага 1, 3, 10 со II квартала 2012 г.)	Стандарт	3 МГц (14 бит) Со II квартала 2012 г. — 10 МГц (14 бит)	80 МГц (16 бит) Вторая половина 2013 г.

полосы могут входить либо в штатный набор фильтров ПЧ спектроанализатора, либо их можно устанавливать в качестве опций.

Относительно максимальной полосы анализа СК4-БЕЛАН 400 несколько уступает зарубежным аналогам (табл. 2). На момент публикации прибор стандартно поставляется с полосой пропускания 3 МГц. Однако во втором квартале 2012 года будет проведена модернизация блока цифровой обработки, который стандартно будет обеспечивать полосу 10 МГц на 14 битах. Также ведутся опытно-конструкторские работы по реализации оцифровщика с полосой 30 и 80 МГц на 16 битах, который предположительно пойдет в серию во второй половине 2013 года.

Чувствительность и уровень шума

Чувствительность является очень важным параметром любой приемно-анализирующей аппаратуры, поскольку она характеризует способность прибора регистрировать слабые сигналы. В рекламной и технической литературе, касающейся анализаторов спектра, часто термин «чувствительность» употребляют синонимично понятию среднего уровня собственных шумов (англ. displayed average noise level, DANL). Здесь следует уточнить, что термин «средний уровень собственных шумов» (DANL) определяет усредненный уровень шумовой дорожки анализатора спектра в заданной полосе ПЧ (например, в полосе 1 Гц) при 50-омной нагрузке на входе.

Термин «чувствительность» определяет минимальный уровень сигнала, который прибор может зафиксировать. Если сигнал на входе анализатора равен по амплитуде DANL, то, при соответствующей видеофильтрации, он будет зарегистрирован как характерный «бугорок», превышающий шумовую дорожку примерно на 2,2 дБ. Таким образом, в пределе чувствительность равна среднему уровню шума.

Однако иногда термин «чувствительность» может включать в себя определенное пользователем соотношение сигнал/шум (например, 10 дБ). Поскольку соотношение сигнал/шум в системах может быть разным, при сравнениях различных анализаторов корректнее оперировать термином «средний уровень собственных шумов», и, конечно, нужно быть уверенными в том, что мы сравниваем одинаковые величины. Для примера, средний уровень собственных шумов в –140 дБм/Гц и чувствительность –130 дБм/Гц (сигнал/шум 10 дБ) — это одна и та же величина.

Другим параметром, который характеризует способность анализатора принимать слабые сигналы, является собственный коэффициент шума прибора, из него легко рассчитывается средний уровень шумов в дБм/Гц. Нужно помнить, что коэффициент шума у анализатора спектра при расширении полосы пропускания всегда один и тот же, а вот средний уровень собственных шумов растет на $10\lg(RBW_1/RBW_2)$. Если мы говорим о том, какой минимальный сигнал может принять анализатор, недостаточно знать один лишь коэффициент шума, всегда нужно знать, какой у данного анализатора минимальный фильтр ПЧ. Сравнительный анализ анализаторов спектра высокого уровня по критерию минимального уровня собственных шумов (минимального принимаемого сигнала) делать проще, поскольку такие анализаторы обязательно имеют фильтр ПЧ 1 Гц. То же самое нельзя сказать, например, об анализаторах среднего класса, которые могут иметь минимальный фильтр в 10 Гц, а производитель при этом нормирует средний уровень собственного шума в дБм/Гц.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что минимальный уровень шума и чувствительность анализатора спектра определяются блоками 1 и 3 (рис. 1). При этом коэффициент шума анализатора задается блоком 1, а блок 3 или в полной мере позволяет воспользоваться низким коэффициентом шума тракта преобразования, или же накладывает свои ограничения (например, при отсутствии узкополосных фильтров). Важным элементом блока 3 является усилитель ПЧ с регулируемым коэффициентом усиления, который масштабирует по уровню принятый сигнал в диапазон оптимальных напряжений оконечного АЦП. Рассмотрим этот элемент подробнее.

Если взять односигнальную динамику 14-битного АЦП, то она, как говорилось выше, составит 84,28 дБ, дополнительная фильтрация и БПФ с большим количеством точек позволяют увеличить ее до типового значения 135–138 дБ при фильтре 1 Гц. Если предположить, что усилитель ПЧ в блоке 3 отсутствует, то уровень шумов прибора в целом был бы –135–138 дБм/Гц, притом что коэффициент шума у высококлассного прибора находится на уровне 20 дБ (DANL = –154 дБм/Гц). Кроме того, известно, что на малых значениях входных напряжений погрешность АЦП резко увеличивается. Таким образом, точность измерений малых уровней без УПЧ гарантировать нельзя. В действительности УПЧ решает две задачи: он позволяет принципиально реализовать измерение сигналов, которые «не видит» непосредственно АЦП, то есть близких к шумовому порогу тракта прибора, и дополнительно он качественно улучшает точностные характеристики при измерениях сигналов малого уровня.

Когда речь идет об оптимизации коэффициента шума блока 1, то требования к отдельным узлам формулируются тривиальным образом. Пассивные элементы тракта (кабельные сборки, разделительные емкости, аттенюаторы, переключатели) должны иметь минимальные вносимые потери и низкий КСВ. Активные элементы должны обеспечивать максимальное и равномерное усиление, низкий КСВ и минимальный коэффициент шума. Преобразователи частоты должны иметь низкие потери преобразования. Несмотря на тривиальность этих требований, их очень сложно выполнить в широкой полосе частот. Если мы вернемся к рис. 7, то увидим, что в СК4-БЕЛАН 400 от входа прибора до УПЧ в блоке 3 реализовано равномерное усиление преобразования на уровне 15 дБ. Коэффициент шума прибора, в целом, в этом случае определяется суммарными потерями в тракте до первого активного элемента (усилителя 3–40 ГГц) плюс коэффициент шума этого активного элемента.

Характерной особенностью тракта преобразования СК4-БЕЛАН 400 является использование широкополосного усилителя сразу после ЖИГ-фильтра. Это позволяет решить две задачи:

- Нейтрализовать коэффициент шума всех преобразователей частоты, фильтров, кабельных сборок и т.д.
- Оптимизировать равномерность коэффициента передачи за счет изоляции смесителя, который имеет неидеальную развязку RF-LO, от ЖИГ-фильтра и устранения нежелательных переотражений. Минусом такого решения является уменьшение динамики в традиционном спектроанализаторе (в СК4-БЕЛАН 400 этого не происходит).

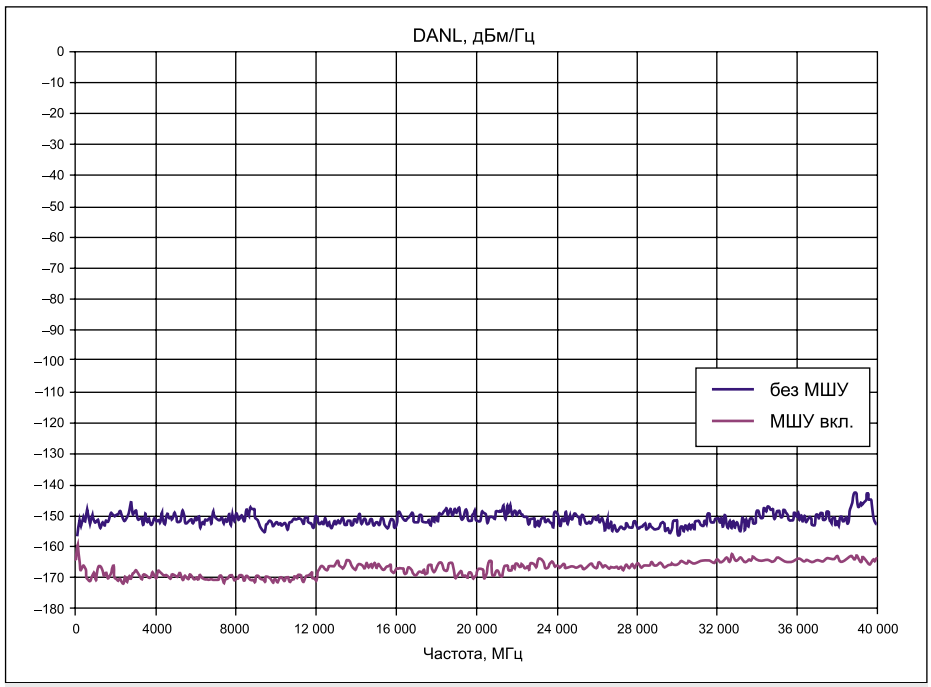


Рис. 8. Средний уровень собственных шумов СК4-БЕЛАН 400 в режимах включенного и выключенного МШУ (опция 054)

Таблица 3. Сравнение среднего уровня собственных шумов спектроанализаторов до 40 ГГц (аппаратная реализация, без программных коррекций) в режиме включенного/выключенного МШУ

Название прибора	DANL на частоте 1 ГГц, дБм/Гц (МШУ вкл./выкл.)	DANL на частоте 10 ГГц, дБм/Гц (МШУ вкл./выкл.)	DANL на частоте 25 ГГц, дБм/Гц (МШУ вкл./выкл.)	DANL на частоте 40 ГГц, дБм/Гц (МШУ вкл./выкл.)
PSA E4447A/110	−154/−165	−146/−162	−140/−155	−131/−146
PXA N9030A-543-P43	−155/−165	−154*/−161	−146*/−159	−142*/−153
8564EC	−145/нет	−143/нет	−136/нет	−130/нет
Rohde & Schwarz FSU43/B24	−154 (−156**)/−167	−150 (−153**)/−168	−143 (−148**)/−166	−133 (−141**)/−161
Rohde & Schwarz FSQ40/B24	−154 (−156**)/−167	−150 (−153**)/−168	−143 (−148**)/−166	−133 (−141**)/−161
Rohde & Schwarz FSV40/B22	−154/−165	−148/нет	−145/нет	−139/нет
Anritsu MS2830A-045-068	−153 (−153**)/−163	−147 (−151**)/−160	−141 (−146**)/−156	−135 (−144**)/−150
СК4-БЕЛАН 400/054	−152***/−168	−153***/−169	−152***/−166	−150***/−164

Примечания.
* Параметр указан для малошумящего тракта (опция LNP), в обычной реализации тракта шум значительно хуже.
** У анализаторов FSU/FSQ, а также MS2830A-045 параметры шума в режиме выключенного усилителя сильно отличаются в зависимости от наличия опции усилителя и связанных с ним СВЧ-переключателей.
Когда усилителя в приборе нет (отсутствуют потери в ключах), параметры шума лучше, они приводятся в скобках.
Однако в этом случае минимальный коэффициент шума в приборе не реализуется, поскольку МШУ нет.
*** Параметры приводятся для случая, когда усилитель и переключатели (опция 054) в тракте есть.
Если усилителя нет, параметры шума без МШУ еще лучше (поскольку нет лишних потерь в СВЧ-ключах).

Для измерений коэффициента шума активных устройств необходимо, чтобы приемно-анализирующая аппаратура имела как можно более низкий собственный коэффициент шума. Для этой задачи в тракт преобразования СК4-БЕЛАН 400 опционально встраивается дополнительный малошумящий отключаемый усилитель (рис. 1). Специфика конкретной аппаратной реализации заключается в том, что этот усилитель имеет высокий коэффициент усиления (30 дБ) и работает от 100 кГц до верхней граничной частоты прибора, что позволяет разместить его в непосредственной близости от входа прибора, не только перед ЖИГ-фильтром, но и перед переключателем каналов приема. Это дает возможность свести весь коэффициент шума прибора к коэффициенту шума данного усилителя плюс потери элементов, расположенных в тракте до него, то есть к типовому значению в 10 дБ на частоте 40 ГГц. На момент публикации статьи анализаторов, которые на частоте 40 ГГц имеют меньший коэффициент шума, в мире не существовало. Минимальный уровень собственных шумов СК4-БЕЛАН 400 с включенным МШУ (опция 054) и выключенным МШУ (стандартное исполнение) показан на рис. 8. Сравнение среднего уровня собственных шумов у разных анализаторов до 40 ГГц на разных частотах приведено в таблице 3.

Продолжение следует