

Окончание. Начало в № 4`2012

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.

Третья часть статьи завершает сравнительный анализ лучших анализаторов спектра до 40 ГГц. В заключительной части основное внимание уделяется вопросам точности и скорости измерений.

Точность частотных измерений

Точностные характеристики современного анализатора спектра применительно к измерению частоты можно разделить на две категории: точность по частоте в режиме счетчика и точность по частоте в режиме маркера. Точность в режиме счетчика сводится к погрешности опорного источника и разрядности счетчика. Точность в режиме маркерных измерений обычно описывается формулой вида (4).

Из анализа формулы (4) следует несколько выводов. Первое: на широких полосах обзора наибольший вес имеют слагаемые 2 и 4. Часто из спецификации производителя

не вполне ясно, какой именно смысл вкладывается в понятие «количество точек». «Количество точек», с одной стороны, может обозначать количество пикселей, отведенных под отрисовку измерительной трассы. С другой стороны, количество пикселей может означать количество точек настройки синтезированного гетеродина. Очевидно, что количество точек настройки гетеродина может значительно превышать горизонтальное разрешение дисплея, кроме того, количество точек настройки гетеродина — это переменная величина, которая зависит от соотношения полосы обзора к фильтру ПЧ. Например, в «СК4-БЕЛАН 400» для исключения пропуска сигнала и деградации амплитуды коли-

чество точек свипирования всегда в три раза больше отношения полосы обзора к полосе пропускания. В итоге на один пиксель может приходиться более 100 точек свипирования.

В «СК4-БЕЛАН 400» при помощи ручки плавной регулировки маркер перемещается между пикселями, соответственно, разрешение по частоте в широкой полосе обзора определяется количеством пикселей в режиме ручного управления маркером. Однако при автоматическом поиске пика сигнала прибор уточняет частотное значение максимума, выбирая его из всех точек свипирования, которые приходятся на заданный пиксель. Следовательно, в режиме поиска максимума горизонтальное разрешение можно существенно улучшить. Отсюда следует второй вывод: в режиме поиска максимума основной вес будет иметь слагаемое 2. Оно, в свою очередь, зависит от того, синтезирован ли гетеродин в каждой точке или же перестраивается аналоговым образом.

Третье: в узких полосах обзора основной вклад в общую погрешность измерения будет вносить опорный источник (слагаемое 1).

Четвертое: для повышения точности измерения частоты в узких полосах обзора предпочтительно иметь задающий опорный генератор на частоте 10 МГц, а не 100 МГц, поскольку у генератора 10 МГц обычно существенно лучшие параметры погрешности начальной установки частоты, старения и температурной стабильности. Для анализатора спектра с опорным генератором с общей погрешностью частоты $\pm 1 \times 10^{-7}$ на частоте 1 ГГц граничной полосой обзора, где начнет доминировать опорный источник, будет полоса 100 кГц, а на частоте 10 ГГц — полоса 1 МГц (количество точек — 1001). Чем лучше опорный источник, тем уже обозначенная граничная полоса. Слагаемое 3 может иметь серьезный вес, в основном, при использовании аналоговых фильтров; для современных блоков цифровой обработки оно играет роль

$$\delta F = \text{Значение маркера} \times \text{Погрешность опоры} + \text{0,1\% от полосы обзора} + \text{5\% от фильтра ПЧ} + \text{Полоса обзора / (количество точек - 1)} + 2N \quad (4)$$

Таблица 7. Таблица основных составляющих погрешности измерений частоты по маркеру у современных анализаторов спектра до 40 ГГц

Название прибора	Погрешность опорного источника*	Погрешность полосы обзора	Погрешность полосы пропускания	Количество точек**
Agilent E4447A	$\pm 1,8 \times 10^{-7}$	$\pm 0,2\%$	<1% до 300 кГц	601/(8192)
Agilent N9030A-543	$\pm 1,55 \times 10^{-7}$	$\pm 0,1\%$	<1% до 100 кГц	1001/(40 001)
Agilent 8564EC	$\pm 1,3 \times 10^{-7}$	$\pm 1\%$	$\pm 10\%$ до 300 кГц	Нет данных
Rohde & Schwarz FSU43	$\pm 1,8 \times 10^{-7}$ (опционально $\pm 5 \times 10^{-8}$)	$\pm 0,5\%$	<3% до 100 кГц, <10% до 5 МГц	624/(нет данных)
Rohde & Schwarz FSQ40	$\pm 1,8 \times 10^{-7}$ (опционально $\pm 5 \times 10^{-8}$)	$\pm 0,5\%$	<3% до 100 кГц, <10% до 5 МГц	624/(нет данных)
Rohde & Schwarz FSV40	$\pm 2,5 \times 10^{-8}$ (опционально $\pm 4,6 \times 10^{-9}$)	$\pm 0,05\%$	<3%	691/(32 001)
Anritsu MS2830A-045	$\pm 1,7 \times 10^{-7}$ (опционально $\pm 3 \times 10^{-8}$)	$\pm 0,2\%$	1%***	10 001 (max)
СК4-БЕЛАН 400****	$\pm 3 \times 10^{-7}$ (опционально $\pm 5 \times 10^{-8}$)*****	$\pm 0,5\%$	<5% до 300 кГц	571/(50 001)

Примечания. * Включает старение, температурный уход и точность начальной установки.

** Значение по умолчанию/максимальное значение (дано в скобках).

*** Очевидно, что приведенное значение не учитывает широких фильтров ПЧ.

**** Применительно к СК4-БЕЛАН 400 указаны графическое разрешение в пикселях/максимальное количество точек настройки гетеродина (указано в скобках).

***** Опция, добавляющая встроенный опорный генератор 10 МГц с повышенной стабильностью частоты.

Доступна для заказа со II квартала 2012 года.

только при специфических пользовательских настройках, например, когда фильтр ПЧ значительно шире значения, используемого по умолчанию. В современных БЦО типичная погрешность выше 5% характерна, как правило, только для широких полос пропускания (более 1 МГц). Когда подобные фильтры используются при широком спане, эта погрешность оказывается незначительной по сравнению с ограничением со стороны горизонтального разрешения (погрешности полосы обзора). Для фильтров уже 100 кГц погрешность обычно не превышает 1%, что на высоких частотах ниже погрешности, диктуемой опорным источником.

Для сравнения погрешности частотных измерений у лучших современных анализаторов спектра до 40 ГГц мы свели в таблицу 7 основные составляющие погрешности применительно к каждому из рассматриваемых приборов.

Точность амплитудных измерений

Точность измерения амплитуды — это тот параметр, на улучшение которого разработчики современных анализаторов спектра направляли серьезнейшие усилия в течение последних 10 лет. Традиционно анализаторы спектра существенно уступали измерителям мощности в отношении нормируемых погрешностей амплитуды, кардинально превосходя их по частотно-избирательным свойствам. Сегодня многие приложения в телекоммуникационной, аэрокосмической и оборонной отраслях наряду с необходимостью частотной селекции диктуют также повышенные требования к точности измерения уровня сигнала. Основные шаги на пути приближения характеристик спектроанализаторов к точностным параметрам измерителей мощности были сделаны благодаря развитию цифровой схемотехники и усовершенствованию цифровой обработки сигнала.

Один из ведущих производителей КИА СВЧ — компания Agilent — в своих технических материалах, посвященных точности измерения уровня при помощи анализатора спектра, выделяет несколько основных составляющих итоговой погрешности. А именно: погрешность, связанная с частотной неравномерностью тракта преобразования; погрешность, связанная с переключением СВЧ-аттенюатора; погрешность, обусловленная регулировкой коэффициента усиления в блоке ПЧ; погрешность, обусловленная идеальностью логарифмической шкалы (логарифмического усилителя); погрешность, связанная с переключением фильтров ПЧ; погрешность, связанная с передачей единицы амплитуды калибратору опорного уровня; погрешность, связанная с рассогласованием на этапе заводской калибровки и рассогласованием во время измерения. У разных анализаторов спектра, в зависимости от используемой архитектуры

и идеологии калибровки, указанные составляющие погрешности могут иметь разный вес, некоторые из них (например, идеальность логарифмической шкалы) могут вовсе отсутствовать в определенной аппаратной реализации.

Для оценки итоговых точностных параметров анализатора спектра сегодня на практике чаще всего используются статистические данные, а не гарантированные спецификации, основанные на суммировании составляющих погрешности. Для вычисления стандартного отклонения (σ) рассчитывается квадратный корень из суммы квадратов указанных составляющих погрешности, а затем соответствующий доверительный интервал используется в спецификации. Наиболее распространенным является критерий 95%-ной вероятности 2σ (95,4%). Такой подход основан на том, что если результирующая погрешность вызвана совместным действием нескольких независимых случайных погрешностей, то результирующая погрешность имеет нормальное распределение вероятности. Далее мы рассмотрим точность амплитудных измерений применительно к анализатору «СК4-БЕЛАН 400» в контексте статистических оценок и сравним его параметры с зарубежными аналогами.

Анализ точностных параметров «СК4-БЕЛАН 400» следует начать с рассмотрения процесса калибровки прибора. Заводскую калибровку прибора можно разделить на два этапа: на первом этапе калибруется блок цифровой обработки сигнала (блок 3 на рис. 1), на втором — частотная неравномерность тракта преобразования (блок 1 на рис. 1). Калибровка блока цифровой обработки осуществляется следующим образом. В качестве опорного сигнала используется сигнал прецизионного калибратора измерителя мощности Anritsu ML2496A на частоте 50 МГц с уровнем 0 дБм. Для высокоуровневых смесителей, которые используются в «СК4-БЕЛАН 400», сигнал 0 дБм по входу прибора означает работу в штатном линейном режиме (компрессия ниже 0,05 дБ).

Путем регулировки цифрового аттенюатора в блоке УПЧ первоначально выставляется сквозной коэффициент передачи, обеспечивающий известное опорное значение напряжения на входе оконечного АЦП. Далее, поскольку нам известно напряжение на входе АЦП (и код на его выходе), соответствующее уровню 0 дБм по входу прибора, мы можем с высокой точностью вычислить погрешность каждого 10-децибельного шага входного СВЧ-аттенюатора 70 дБ (и тем самым свести ее к нулю). После этого в нашем распоряжении оказываются дополнительные 70 дБ регулировки уровня опорного сигнала 0 дБм при помощи СВЧ-аттенюатора.

При помощи этого опорного калибратора с диапазоном регулировки уровня 70 дБ осуществляется прецизионная градуиров-

ка опорных уровней от 0 до -70 дБм вниз и от 0 до +30 дБм вверх по вертикальной шкале на частоте 50 МГц. Коэффициент усиления в блоке УПЧ регулируется в диапазоне свыше 60 дБ при помощи аттенюаторов, управляемых 16-разрядными ЦАП, и запоминается для каждого значения опорного уровня. При опорном уровне в -70 дБм АЦП с дополнительной математической обработкой (накопление отсчетов с последующим БПФ) имеет не менее 130 дБ динамического диапазона (в минимальной полосе пропускания) с пренебрежительно малой погрешностью логарифмирования. Инструментальную погрешность АЦП можно оценить по формуле (5).

Для любой полосы пропускания цифрового измерителя есть величина $-ERR_{1дБ}$, при которой инструментальная ошибка АЦП составит 1 дБ, эту величину можно условно назвать «уровнем ошибки АЦП на 1 дБ». В приборе «СК4-БЕЛАН 400» опорной является полоса пропускания 30 кГц, для нее $-ERR_{1дБ}$ составляет -80 дБ FS. Очевидно, что при сужении полосы анализа относительно опорного фильтра 30 кГц значение $-ERR_{1дБ}$ в показателе степени должно уменьшаться на $10\lg RBW_{30кГц}/RBW_{ИЗМ}$. При сужении фильтра к погрешности, вычисленной по формуле (5) с учетом поправки $10\lg RBW_{30кГц}/RBW_X$, следует добавить погрешность на переключение полосы пропускания: $\pm 0,05$ дБ:

$$\delta_{АЦП, дБ} = 10^{(-ERR_{1дБ}-A)/20}, \quad (5)$$

где $-ERR_{1дБ}$ — уровень, при котором АЦП начинает ошибаться на 1 дБ, соответствует -80 дБ FS для опорного фильтра ПЧ 30 кГц; A — измеряемый уровень сигнала в дБ FS (децибелах относительно полной шкалы АЦП).

В результате калибровки БЦО мы получаем калиброванное измерение во всем диапазоне входных уровней от +30 до -150 дБм на одной частоте (50 МГц). Оценим составляющие погрешности этой калибровки:

- Точность установки уровня калибратора: $\pm 0,4\%$ ($\pm 0,017$ дБ).
- Рассогласование между калибратором и входом прибора: $20\log_{10}(1 \pm \rho_{КАЛИБР} \times \rho_{АС}) = 20\log_{10}(1 \pm 0,048 \times 0,09) = \pm 0,037$ дБ.
- Повторяемость переключения СВЧ-аттенюатора = $\pm 0,03$ дБ.
- Погрешность, связанная с логарифмированием и переключением фильтров ПЧ, = $\pm 0,05$ дБ.
- Погрешность, связанная с подбором коэффициента усиления, = 0 дБ.
- Инструментальная погрешность АЦП $< \pm 0,03$ дБ (при условии, что мы всегда работаем на 30 дБ выше «уровня ошибки АЦП на 1 дБ»).

Считаем указанные погрешности статистически независимыми. При этом стандартное отклонение (σ):

$$\pm \sqrt{0,017^2 + 0,037^2 + 0,03^2 + 0,03^2 + 0,05^2} = \pm 0,077 \text{ дБ.}$$

На втором этапе производится калибровка частотной неравномерности тракта. Для этого мы передаем единицу мощности 0 дБм генератору Anritsu MG3694C в диапазоне частот от 10 МГц до 40 ГГц при помощи измерителя мощности Anritsu ML2496A и прецизионного детектора MA2444D. Поскольку коррекция мощности генератора осуществляется для одного значения уровня, мы можем исключить из результирующей погрешности составляющую ошибки, характеризующую линейность детектора. Для улучшения согласования по выходу генератора используется прецизионный аттенуатор 3 дБ Anritsu 41КС3. После этого откорректированный по амплитуде сигнал подается на вход «СК4-БЕЛАН 400», и осуществляется измерение коэффициента передачи на каждой калибровочной частоте (шаг 10 МГц до 3 ГГц и 100 МГц выше 3 ГГц) при всех положениях СВЧ-аттенуатора. В СВЧ-диапазоне 3–40 ГГц перед измерением коэффициента передачи осуществляется центровка преселектора. Оценим составляющие погрешности второго этапа калибровки.

На частотах до 3 ГГц:

- Точность установки уровня калибратора: $\pm 0,4\%$ ($\pm 0,017$ дБ).
- Инструментальная погрешность ваттметра: $\pm 0,5\%$ ($\pm 0,022$ дБ).
- Погрешность калибровки частотной неравномерности детектора: $\pm 0,79\%$ ($\pm 0,034$ дБ).
- Погрешность на рассогласование при обнулении и градуировке детектора: $\pm 0,23\%$ ($\pm 0,01$ дБ).
- Погрешность на рассогласование между детектором и генератором до 3 ГГц: $20\log_{10}(1 \pm \rho_{ДЕТЕКТОР} \times \rho_{ГЕНЕРАТОР}) = 20\log_{10}(1 \pm (0,038 \times 0,048)) = \pm 0,016$ дБ. (За счет фиксированного аттенуатора 3 дБ КСВН генератора составляет 1,1 до 3 ГГц.)
- Погрешность на рассогласование между генератором и анализатором до 3 ГГц: $20\log_{10}(1 \pm \rho_{АС} \times \rho_{ГЕНЕРАТОР}) = 20\log_{10}(1 \pm (0,048 \times 0,09)) = \pm 0,037$ дБ. (За счет фиксированного аттенуатора 3 дБ КСВН генератора составляет 1,1 до 3 ГГц.)
- Повторяемость переключения СВЧ-аттенуатора $\pm 0,03$ дБ.

При статистической независимости всех погрешностей стандартное отклонение (σ):

$$\pm \sqrt{0,017^2 + 0,022^2 + 0,034^2 + 0,01^2 + 0,016^2 + 0,037^2 + 0,03^2} = \pm 0,067 \text{ дБ,}$$

а стандартное отклонение калибровок БЦО и АЧХ до 3 ГГц:

$$\pm \sqrt{0,077^2 + 0,067^2} = \pm 0,102 \text{ дБ.}$$

Далее учтем температурно-временную стабильность тракта и БЦО:

- Стабильность БЦО за 8 ч непрерывной работы в диапазоне температур $+20 \dots +30$ °C: $\pm 0,10$ дБ.
- Стабильность тракта за 8 ч непрерывной работы в диапазоне температур $+20 \dots +30$ °C: $\pm 0,3$ дБ.

Стандартное отклонение амплитудных измерений с учетом температурно-временной стабильности до 3 ГГц:

$$\pm \sqrt{0,077^2 + 0,067^2 + 0,3^2 + 0,1^2} = \pm 0,322 \text{ дБ.}$$

Доверительный интервал 2σ (95,4%) до 3 ГГц $\pm 0,664$ дБ. Доверительный интервал 3σ (99,6%) до 3 ГГц $\pm 0,996$ дБ.

Данные об остаточных погрешностях для диапазонов 3–10, 10–20 и 20–40 ГГц рассчитываются аналогичным образом. При расчетах погрешностей, по сравнению с диапазоном от 9 кГц до 3 ГГц, изменяются только параметры рассогласования при калибровке и характеристики температурного дрейфа тракта. Температурно-временной дрейф тракта в диапазоне 3–40 ГГц также включает параметры температурно-временной нестабильности ЖИГ-фильтра (точнее сказать, в значительной степени ими определяется).

Сведем данные о составляющих погрешности «СК4-БЕЛАН 400» для удобства в таблицу 8.

В таблице 8 для оценки результирующей погрешности по критерию 95,4% мы приводим два значения. Первое значение включает

Таблица 8. Составляющие погрешности и результирующая общая погрешность измерения уровня (вероятность 95,4%) для «СК4-БЕЛАН 400»

Диапазон частот	Остаточная погрешность калибровки БЦО / дрейф БЦО (за 8 ч)		КСВН детектора MA2444D	Точность установки уровня калибратора в ML2496A / инструментальная погрешность ваттметра	Погрешность калибровки частотной неравномерности детектора	Погрешность на рассогласование при обнулении и градуировке детектора	КСВН генератора MS3694C с аттенуатором 41КС3		КСВН СК4-БЕЛАН 400	Погрешность рассогласования ваттметр + генератор	Погрешность рассогласования генератор + СК4-БЕЛАН 400	Повторяемость значений СВЧ-аттенуатора при переключении	Температурный дрейф тракта (за 8 ч)	Результирующая погрешность для доверительного интервала 2σ
	$\pm 0,077 / \pm 0,1$	$\pm 0,077 / \pm 0,022$					1,1	1,2						
9 кГц...3 ГГц		1,08					1,1	1,2	$\pm 0,016$	$\pm 0,037$			$\pm 0,3$	$\pm 0,664 / \pm 0,204$
3–10 ГГц		1,16					1,2	1,5	$\pm 0,058$	$\pm 0,155$			$\pm 0,6$	$\pm 1,275 / \pm 0,381$
10–20 ГГц		1,2					1,3	1,6	$\pm 0,1$	$\pm 0,256$			± 1	$\pm 2,092 / \pm 0,581$
20–40 ГГц		1,44					1,5	1,8	$\pm 0,307$	$\pm 0,483$			$\pm 1,5$	$\pm 3,223 / \pm 1,16$

температурно-временной дрейф прибора за 8 ч непрерывной работы. Второе значение дано без учета температурно-временного дрейфа и достигается сразу после калибровки, оно иллюстрирует предельную точность прибора. Оба значения даны для диапазона входных уровней 0...–80 дБм и для положений входного аттенуатора от 10 до 50 дБ (соотношение сигнал/шум — не менее 20 дБ).

Сравнительные данные по точностным характеристикам измерения уровня современных анализаторов спектра до 40 ГГц сведены в таблицу 9. Обратим внимание на некоторые особенности нормирования итоговой погрешности измерения амплитуды в этой таблице. Rohde & Schwarz и Anritsu нормируют результирующую погрешность как 2σ во всем диапазоне частот, то есть одинаково. Выше мы аналогичным образом пронормировали погрешность для «СК4-БЕЛАН 400». Для анализаторов спектра Agilent PXA, PSA производитель нормирует погрешность в интервале 2σ только для диапазона трехкратного преобразования. Однако эту погрешность нельзя получить, если вычислить RSS от указанных в спецификации составляющих данной погрешности. Поэтому данную погрешность мы приводим в скобках. Это не означает, что мы хотим поставить ее под сомнение, однако мы обращаем внимание на то, что рассчитывается она отличным от погрешностей остальных анализаторов способом.

Для СВЧ-диапазона PXA и PSA (и для всего диапазона 8564EC) Agilent нормирует только основные составляющие погрешности измерения (например, частотную неравномерность, погрешность калибратора и т. д.). Для приведения итоговой погрешности анализаторов Agilent в логическое соответствие с остальными рассматриваемыми приборами мы вычислили интервал 2σ , оперируя только двумя основными составляющими погрешности (погрешностью калибра-

Таблица 9. Таблица характеристик точности измерения уровня современных анализаторов спектра до 40 ГГц

Название прибора	Погрешность на частоте до 3 ГГц, дБ (2σ)	Погрешность на частоте до 10 ГГц, дБ (2σ)	Погрешность на частоте до 20 ГГц, дБ (2σ)	Погрешность на частоте до 40 ГГц, дБ (2σ)
Agilent E4447A	$\pm 0,32$ ($\pm 0,19$)	$\pm 1,21$	$\pm 2,4$	± 2
Agilent N9030A-543	$\pm 0,32$ ($\pm 0,19$)	$\pm 1,09$	$\pm 1,25$	$\pm 2,48$
Agilent 8564EC	± 1	$\pm 2,8$	$\pm 3,5$	$\pm 3,2$
Rohde & Schwarz FSU43	$\pm 0,3$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1,8$
Rohde & Schwarz FSQ40	$\pm 0,3$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1,8$
Rohde & Schwarz FSV40	$\pm 0,28$	± 1	$\pm 1,32$	$\pm 1,65$
Anritsu MS2830A-045	$\pm 0,5$	$\pm 1,8$	± 3	$\pm 3,5$
СК4-БЕЛАН 400	$\pm 0,66$ ($\pm 0,2$)	$\pm 1,28$ ($\pm 0,38$)	$\pm 2,09$ ($\pm 0,58$)	$\pm 3,22$ ($\pm 1,16$)

тора и частотной неравномерностью тракта). При этом мы использовали не гарантированные, а типичные значения для температурного диапазона +20...30 °С. Это вычисленное значение 2σ и приводится в таблице для анализаторов Agilent.

Скорость

Скорость — это тот параметр, которому с недавнего времени стали уделять повышенное внимание при построении анализаторов спектра. Этому есть несколько причин. Первая заключается в том, что интенсивное развитие современных систем связи (в первую очередь беспроводных) потребовало от современных производителей оборудования связи существенно расширить объемы производства, а также максимально сократить циклы проектирования и отладки новых изделий. Следовательно, время, затрачиваемое на измерения на стадии разработки и на этапе серийного производства, с точки зрения рынка — фактор первостепенной важности. Другая причина связана с тем, что развитие элементной базы сделало возможным «ускорение», с одной стороны, частотного синтеза, а с другой — цифровой обработки сигнала.

Применительно к анализаторам спектра можно сформулировать несколько тезисов, касающихся скорости прибора. На сравнительно узких полосах обзора, когда требуемые значения полос пропускания оказываются <1 кГц, большинство современных приборов применяют быстрое преобразование Фурье. Скорость в этом режиме будет определяться вычислительной мощностью процессора, который используется для расчета БПФ. На полосах обзора примерно до 100 МГц при фильтрах ПЧ шире 1 кГц скорость прибора будет определяться, во-первых, скоростью гетеродинного синтезатора малого шага (при использовании в синтезаторе малого шага DDS ограничения со стороны скорости перестройки гетеродина фактически отсутствуют), а во-вторых, отношением спана к квадрату полосы пропускания. Часто это отношение представляют формулой (6) вида:

$$T_{РАЗ} = (kBW_{ОБЗОР})/RBW^2, \quad (6)$$

где k — это постоянная времени для фильтра с заданной импульсной и амплитудно-частотной характеристикой.

При расширении полосы обзора до единиц и десятков гигагерц и использовании широких полос пропускания (≥ 1 МГц) основные скоростные ограничения начинает диктовать синтезированный гетеродин и следящий преселектор. Для анализаторов спектра без преселектора — только синтезированный гетеродин. Скорость синтезированного гетеродина в широкой полосе обзора зависит от того, на чем реализовано его ядро: на ЖИГ-генераторе или на генераторе, управляемом

напряжением (ГУНе). За последние годы синтезаторная тематика, связанная с ГУНами, развивалась впечатляющими темпами: появилось достаточное количество широкополосных октавных ГУНов (например, Hittite HMC733), готовых чипсетов целочисленных и фракциональных синтезаторов (например, Hittite HMC699, HMC703 и т. д.), а также готовых прецизионных модульных синтезаторов частот (например, QuickSyn FSW-0020 компании PhaseMatrix).

Высокая скорость перестройки, характерная для ГУНов, — в десятки микросекунд на точку (типичное значение в 100 мкс) — позволяет реализовать развертку анализатора спектра в полосе 1 ГГц за время около 1 мс (при количестве точек настройки гетеродина = 1000). 1 мс на полосу 1 ГГц — это приблизительно тот предел, где начинают сказываться ограничения в соответствии с формулой (6), если предположить, что используется фильтр ПЧ 3 МГц и постоянная времени k равна 10. Для генераторов с ЖИГ-перестройкой характерна скорость примерно в 600 МГц/мс. (Хотя за последние годы на рынке появились образцы, позволяющие перекрыть 1 гигагерц за 80 мкс, например, MicroLambda MLMH-0408.) Обратим внимание, что скорость 1 ГГц/мс, которую мы обозначили для ГУН, — это скорость в синтезе. Для ЖИГ-генератора 600 МГц/мс — это скорость в режиме аналогового управления, что означает существенную дополнительную погрешность по частоте.

Развитие синтезаторов на ГУНах сделало возможным серьезное ускорение анализаторов спектра в диапазоне трехкратного преобразования частоты (верхняя граница — от 3 до 7 ГГц у разных анализаторов). Это закрывает основные потребности рынка беспроводной связи, где наиболее широко распространены изделия работают на частотах ниже 6 ГГц. Примерами скоростных приборов могут являться Agilent MXA, Rohde & Schwarz FSV, Anritsu MS2830A (те модели, где нет преселектора). Характерно, что гетеродины этих приборов используют бюджетные синтезаторные решения на ГУНах, что накладывает соответствующие ограничения на их односигнальную динамику (типичный фазовый шум в -105 дБн/Гц вблизи несущей).

При использовании синтезаторов класса FSW-0020 односигнальная динамика приборов могла бы серьезно приблизиться к лучшим образцам в отрасли (Agilent PXA, Rohde & Schwarz FSW/FSQ/FSU, «СК4-БЕЛАН 400»). Упомянутые лучшие с точки зрения односигнальной динамики анализаторы пока используют гетеродины на ЖИГ-генераторах и, как результат, выигрывают по фазовым шумам и проигрывают по скорости. Почему? На этот вопрос можно ответить двояко. Во-первых, даже лучшие синтезаторы на ГУНах (например, QuickSyn) пока проигрывают генераторам (а также синтезированным гетеродинам) с опорой ана-

логичного качества на ЖИГ-ах по фазовым шумам примерно 4–6 дБ. А во-вторых, выигрыш в скорости в диапазоне трехкратного преобразования, который обеспечивается использованием гетеродина на ГУНе, в диапазоне двукратного преобразования (основной диапазон СВЧ-анализатора спектра) сводится к нулю необходимостью использования ЖИГ-преселектора. В будущем проблема увеличения скорости в СВЧ-диапазоне, вероятно, будет решаться за счет использования коммутлируемых банков фильтров и повышения частот первых ПЧ.

Таким образом, можно утверждать, что сегодня есть ряд приборов, которые в диапазоне трехкратного преобразования (верхняя граница от 3 до 7 ГГц) дополнительно оптимизированы по скорости в широких полосах обзора. Это практически не касается СВЧ-диапазона (диапазона двукратного преобразования), где используется преселектор. На полосах обзора шириной в десятки гигагерц фактором, ограничивающим скорость анализатора спектра, по-прежнему является использование компонентов на железитриевом гранате.

«СК4-БЕЛАН 400» с точки зрения скорости является прибором примерно одного уровня с анализатором Agilent 8564ЕС. На широких полосах обзора оба прибора проигрывают по скорости в несколько раз Agilent PXA/PSA и Rohde & Schwarz FSQ/FSU/FSV, а также Anritsu MS2830A. На полосах обзора менее 100 МГц СК4-БЕЛАН 400 опережает Agilent 8564ЕС и приближается к более быстрым конкурентам. Скоростные ограничения «СК4-БЕЛАН 400» по сравнению с топовыми моделями Agilent и Rohde & Schwarz (которые также используют ЖИГ-компоненты) связаны с аппаратной реализацией блока цифрового управления синтезатором (преселектором).

На сегодня минимальное время, которое прибор тратит на одну точку свипирования, составляет 25 мкс. При сканировании полосы в 40 ГГц с фильтром ПЧ 3 МГц осуществляется настройка гетеродина в 40000 точек (время — 1 с). Вместе с задержками в точках переключения диапазонов общее время на полосу 40 ГГц возрастает до 1800 мс. Отметим, что при широкополосном сканировании в «СК4-БЕЛАН 400» заложена избыточность по частотному разрешению для улучшения точности измерения амплитуды сигнала. При меньшем количестве точек и большей амплитудной ошибке скорость может быть даже в нынешней аппаратной реализации кратно увеличена. Однако увеличение скорости за счет ухудшения точности, с точки зрения авторов публикации, не является правильным подходом.

Отставание в скорости в «СК4-БЕЛАН 400» по сравнению с лучшими приборами Agilent и Rohde & Schwarz планируется в перспективе ликвидировать за счет перевода на современную компонентную базу блока цифрового

управления синтезом и кратного увеличения его производительности. В частности, планируется в три раза увеличить тактовую частоту DSP, управляющего основными аппаратными узлами, — с 200 до 600 МГц. Следует отметить, что большинство зарубежных анализаторов спектра при отображении времени развертки часто указывают несколько заниженные цифры. Например, у Agilent 8564EC реальное время обновления измерительной трассы примерно в два раза выше, чем указанное для полной полосы обзора время развертки. В «СК4-БЕЛАН 400» управляющий DSP фиксирует реальное время между выводом одной и той же (первой) точки измерительной трассы при двух последовательных развертках, и именно этот параметр выводится на экран как время свипирования.

Для сравнительной оценки скоростных параметров анализаторов спектра до 40 ГГц мы использовали время развертки (используются настройки прибора по умолчанию) для нескольких полос обзора, в которых мож-

Таблица 10. Время развертки при разных полосах обзора современных анализаторов спектра до 40 ГГц

Название прибора	Полоса обзора 100 МГц, мс	Полоса обзора 1 ГГц, мс	Полная полоса обзора, мс
Agilent E4447A	5	8	250
Agilent N9030A-543	5	8	250
Agilent 8564EC	50	50	800
Rohde & Schwarz FSU43	2,5	6	250
Rohde & Schwarz FSQ40	2,5	6	250
Rohde & Schwarz FSV40	1	1	120
Anritsu MS2830A-045	15	6	250
«СК4-БЕЛАН 400»	15	60	1800

но проводить типовые измерения: 100 МГц, 1 ГГц, полная полоса. Сравнительные данные приведены в таблице 10.

Заключение

В рамках публикации было проведено сравнение лучших современных анализаторов спектра до 40 ГГц по важнейшим метро-

логическим параметрам. В основу сравнительного анализа авторами было положено тщательное изучение принципов построения современных анализаторов спектра и их характеристик с позиции 15-летнего опыта проектирования и производства собственной КИА СВЧ. В статье показана зависимость ключевых метрологических характеристик прибора от особенностей его схемотехнической реализации. Прибор «СК4-БЕЛАН 400», разработанный в ЗАО ПФ «Элвира», на момент публикации является единственным серийно выпускаемым в России анализатором спектра до 40 ГГц. Проведенный анализ позволяет заявить, что «СК4-БЕЛАН 400» по большинству ключевых параметров находится на уровне лучших мировых аналогов. Достижение характеристик такого уровня в отечественном измерительном приборе — весомый научно-технический результат в контексте проводимой в нашей стране программы по развитию высокотехнологичных и наукоемких производств. ■