

РОССИЙСКАЯ СЕРИЯ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА СК4-БЕЛАН: ОТ 2,2 ГГц К 44 ГГц

RUSSIAN SPECTRUM ANALYZERS SK4-BELAN: FROM 2.2 GHz TO 44 GHz

Бельчиков С.А. к.т.н. (S. Belchikov), Бельчиков А.В. д.т.н. (A. Belchikov), ЗАО ПФ «ЭЛВИРА»

Начиная с середины 1980-х годов и до середины 1990-х годов прошлого века в СССР, а затем в России, в силу сложившихся обстоятельств разработки радиоизмерительной аппаратуры, в частности, анализаторов спектра и панорамных измерительных приемников практически не велись. Наиболее достойные анализаторы спектра СВЧ диапазона С4-85, а затем С4-98 выпускались лишь ограниченными партиями. Данные анализаторы были изначально задуманы как аналог широко известного СВЧ анализатора фирмы Hewlett Packard 8566В (100 Гц...22 ГГц), который, несомненно, являлся новым словом в приборостроении, но... только в начале 1980-х годов. В начале 1990-х он был снят с производства и замещен новыми поколениями приборов Hewlett Packard / Agilent Technologies (серией 856хЕ/ЕС, а затем PSA). У других именитых производителей ли-

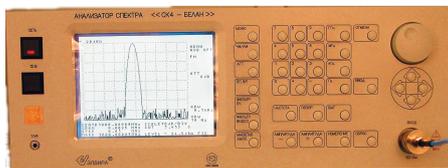


Рис. 1. Анализатор спектра СК4-БЕЛАН

нейки анализаторов спектра также последовательно менялись: так, у компании Rohde & Schwarz сначала выпускались СВЧ анализаторы серии FSM, затем FSE и, наконец, сегодня выпускаются FSU; у компании Advantest на смену анализаторам R3271А пришел сначала R3273, а затем ультрасовременный R3681А.

Таким образом, в то время как за 15 лет за рубежом успели поменяться 3 поколения анализаторов спектра, в нашей стране новых разработок данного типа приборов фактически не велось вовсе. Еще в большей степени это же относилось к панорамным измерительным приемникам: отечественные приборы РСК4-86/87/88/89 до 17,85 ГГц в производство вообще не передавались, а широко известные на территории бывшего СССР селективные микровольтметры SMV производились только в ГДР. К середине 1990-х годов парк отечественной измерительной техники исчерпал свой ресурс на 80-90%. Ниша на рынке отечественной радиоизмерительной аппаратуры, достойной по качеству и приемлемой по цене, оказалась фактически

пуста. Поэтому в 1998 году руководством ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» было принято решение приступить к созданию на современной импортной элементной базе конкурентоспособной радиоизмерительной аппаратуры.

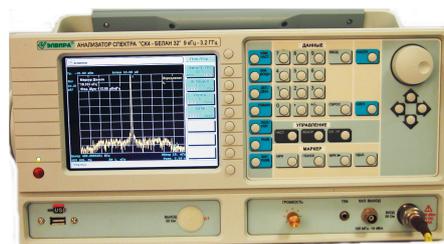


Рис. 2. Анализатор спектра СК4-БЕЛАН 32

В 1998 году номенклатура радиоизмерительной продукции ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» была представлена одним прибором — экономичным анализатором спектра СК4-БЕЛАН для диапазона частот 9 кГц...2200 МГц (рис. 1). На сегодняшний день СК4-БЕЛАН достаточно хорошо известен на рынке и пользуется устойчивым спросом.

По сравнению с отечественными приборами, СК4-БЕЛАН имел ряд существенных достоинств: он отличался малыми габаритами, низкой стоимостью и приличными параметрами, а главное — принципами построения, которые были максимально приближены к западным аналогам. Дело в том, что в бывшем Советском Союзе, в основном,

производились анализаторы спектра без входного аттенюатора. Это не позволяло регулировать уровень входного сигнала на смесителе и, соответственно, существенно ограничивало динамический диапазон прибора. Кроме того, во многих отечественных приборах первый гетеродин не был синтезированным и, как следствие, имел девиацию по частоте около 10 МГц. Соответственно, начальная граница частотного диапазона не могла быть ниже 10 МГц. В тракте ПЧ использовались кварцевые фильтры, что затрудняло, с одной стороны, реализацию фильтра с полосой пропускания меньше 1 кГц, а с другой — их регулировку. Избирательность таких фильтров по уровням -60 дБ/-3 дБ была, как правило, не лучше 12:1 или 15:1. В СК4-БЕЛАН был использован синтезированный гетеродин 2...4 ГГц, реализованный на базе современных синтезаторов прямого синтеза. В результате был достигнут шаг перестройки 10 Гц, а диапазон частот начинался от 9 кГц. Были достигнуты достойная чувствительность прибора (собственный уровень шумов -115 дБм в полосе 1 кГц во всем диапазоне частот прибора) и малый уровень комбинационных помех (около -70 дБн). Был реализован входной аттенюатор 50 дБ, улучшающий динамический диапазон. Кроме того, в анализаторе спектра СК4-БЕЛАН впервые в России был реализован полностью цифровой тракт ПЧ, что

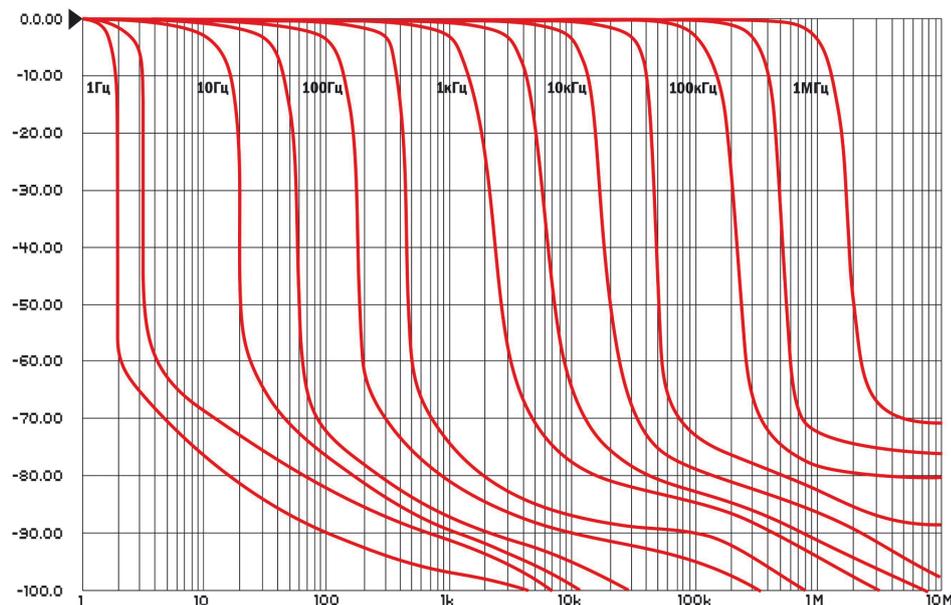


Рис. 3. Динамический диапазон на экране прибора, обусловленный динамикой цифровых фильтров и их избирательностью

Таблица

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СК4-БЕЛАН 32

Параметр	Значение
Частотные характеристики:	
Диапазон рабочих частот:	9 кГц...3,2 ГГц
Минимальный шаг перестройки частоты	0,1 Гц
Опорный источник	термостатированный кварцевый генератор 10 МГц
температурная стабильность	$\pm 2 \times 10^{-8}$
старение	$\pm 1 \times 10^{-7}$ /год
Точность индикации частоты: (установка центральной частоты, начала, конца развертки, маркерные функции) для полосы обзора >2МГц для полосы обзора <2МГц	$\pm(\text{заданная частота} \times \text{точность опорного источника} + 5\% \times \text{полоса обзора} + 15\% \times \text{фильтр ПЧ} + 10 \text{ Гц})$ $\pm(\text{заданная частота} \times \text{точность опорного источника} + 1\% \times \text{полоса обзора} + 15\% \times \text{фильтр ПЧ} + 10 \text{ Гц})$
Полосы обзора	нулевая полоса обзора, далее от 10 Гц/деление до 320 МГц/деление
Точность установки полосы обзора	$\pm 0,5\%$ от установленной полосы
Измеритель частоты: разрешение	1 Гц
погрешность	$\pm(\text{частота маркера} \times \text{точность опорного источника} + 2 \text{ Гц} + \text{последняя цифра счетчика})$
Чувствительность частотомера	не хуже -70 дБм
Скорость развертки при полосе обзора ≥ 100 Гц для фильтров >300 Гц для фильтров ≤ 300 Гц	от 50 мс до 6000 с от 50 мс до 100 кс
Разрешение полосы ПЧ: по уровню -3 дБ: по уровню -6 дБ:	1 Гц...1 МГц с кратностью шага 1, 3, 10 200 Гц, 9 кГц, 120 кГц
Погрешность фильтров	$\pm 10\%$
Избирательность фильтров (по уровням -60 дБ/-3 дБ и -60 дБ/-6 дБ)	<5:1
Диапазон установок видеофильтра	10 Гц...10 кГц с кратностью шага 1, 3, 10
Спектральная плотность фазовых шумов (центральная частота 500 МГц) Отстройка	Фазовые шумы -85 дБн/Гц -95 дБн/Гц -110 дБн/Гц -115 дБн/Гц -125 дБн/Гц
Паразитная ЧМ: при полосе обзора >100 МГц: при полосе обзора <100 МГц:	<50 кГц (межпиковое значение) <1 Гц (межпиковое значение)
Амплитудные характеристики	
Диапазон измерения уровня сигнала: (соотношение сигнал/шум ≥ 10 дБ)	от +30 дБм до -135 дБм
Средний уровень отображаемых шумов: (входной аттенуатор 0 дБ)	Фильтр ПЧ 10 Гц Фильтр ПЧ 1 Гц 9 кГц -140 дБм -150 дБм 100 кГц -138 дБм -148 дБм 1 МГц...1 ГГц -140 дБм -150 дБм 1 ГГц...2 ГГц -138 дБм -148 дБм 2 ГГц...3,2 ГГц -135 дБм -145 дБм
Точка компрессии 1 дБ (двухсигнальный метод, аттенуатор 0 дБ): 9 кГц...1 МГц 1 МГц...200 МГц 200 МГц...780 МГц 780 МГц...1,9 ГГц 1,9 ГГц...3,2 ГГц	-7 дБм -3 дБм -2 дБм -1 дБм -2 дБм
Динамический диапазон:(от точки компрессии до уровня собственных шумов) 9 кГц...1 МГц 1 МГц...200 МГц 200 МГц...780 МГц 780 МГц...1,9 ГГц 1,9 ГГц...3,2 ГГц	141 дБ 147 дБ 148 дБ 148 дБ 143 дБ
(свободный от гармонических искажений 2-го порядка) (свободный от интермодуляционных искажений) Примечание: параметры приводятся для открытого входа смесителя (входной аттенуатор 0 дБ)	максимальный свыше 80 дБ при сигнале -40 дБм на входе смесителя максимальный свыше 80 дБ при двух сигналах, разнесенных на 30 кГц, с уровнем -30 дБм на входе смесителя
Нежелательные комбинационные составляющие:	
Гармонические искажения второго порядка (при сигнале -20 дБм на входе смесителя, SHI = +40 дБм) То же с опцией преселектора (при сигнале -20 дБм на входе смесителя, SHI = +70 дБм)	-60 дБн -90 дБн
Интермодуляционные искажения третьего порядка (два сигнала -30 дБм на входе смесителя с разномом по частоте 30 кГц, TOI = +9 дБм (типичное значение -86 дБн, TOI = +13 дБм))	-78 дБн
Случайные комбинационные составляющие	-75 дБн
Зеркальные отклики	-80 дБн
Остаточные отклики	-110 дБм
Масштабирование экрана	линейный/логарифмический режим
Единицы измерения амплитуды	дБм, дБмВ, дБмкВ, ватт, вольт
Неравномерность АЧХ	$\pm 1,0$ дБ в диапазоне рабочих частот
Ошибка измерения уровня	$\pm 1,5$ дБ в диапазоне рабочих частот
Входной аттенуатор: Диапазон: Точность	от 0 до 50 дБ с шагом 10 дБ от $\pm 0,2$ до $\pm 1,0$ дБ (в зависимости от значения ослабления аттенуатора)
Опорный уровень	-130 дБм +30 дБм при использовании логарифмического масштаба 1 дБ/дел.
Точность установки опорного уровня	$\pm 1,0$ дБ (F= 100 МГц)
Общие характеристики:	
Демодуляторы	АМ, узкополосный ЧМ, широкополосный ЧМ
Детекторы	СКЗ, максимум, минимум, выборки, нормальный, квазипиковый
Автоматические измерения	мощности канала, ширины занятой полосы, мощности гармоник, глубины АМ, ЧМ девиации, коэффициента нелинейных искажений, фазовых шумов (на одной отстройке и как функции от отстройки)
Операционная система	Windows 98
Дисплей	цветной ЖКИ, диагональ 16 см, разрешение 640×480 точек
Вход	радиочастотный вход: разъем N-типа гнездо, 50 Ом, КСВН <2 (при входном аттенуаторе 0 дБ), КСВН <1,5 (при входном аттенуаторе > 10 дБ)
Выходы	радиочастотный выход: разъем SMA (гнездо), третья ПЧ 21,4 МГц, выход калибратора 100 МГц, -10 дБм, разъем BNC (гнездо)
Внешнее управление	интерфейс RS-232, GP-IB
Источник питания	сеть переменного тока напряжением (220 \pm 22) В частотой (50 \pm 0,5) Гц и содержанием гармоник до 5 %
Массогабаритные характеристики	
Габаритные размеры	380×190×420 мм
Масса	16 кг

позволило улучшить избирательность по уровням -60 дБ/ -3 дБ до 5:1. Теоретически была реализована гауссова форма фильтра с коэффициентом прямоугольности 4:1. К недостаткам СК4-

БЕЛАН можно было отнести низкий уровень фазовых шумов, который, впрочем, по меркам отечественного приборостроения можно было считать приемлемым (порядка -100 дБн/Гц при

отстройке от несущей 500 МГц на 20 кГц), а также не развитое, по сравнению с западными аналогами, меню.

Именно на устранении этих недостатков было сосредоточено внимание инженеров ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» в последующие годы. Следует сказать, что с 1999 года одним из направлений деятельности ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» стала поставка в Россию импортных радиоизмерительных приборов вторичного рынка и их последующее сервисное обслуживание. Благодаря данному направлению у наших инженеров появилась возможность наглядно изучать архитектуру, а также интерфейс анализаторов спектра производства компаний Rohde&Schwarz, Agilent Technologies (Hewlett Packard), Anritsu, Advantest, Tektronix самого разного уровня (от низкостоимостной категории до класса high-end), выявлять преимущества и недостатки различных схем построения.

Продолжение следует

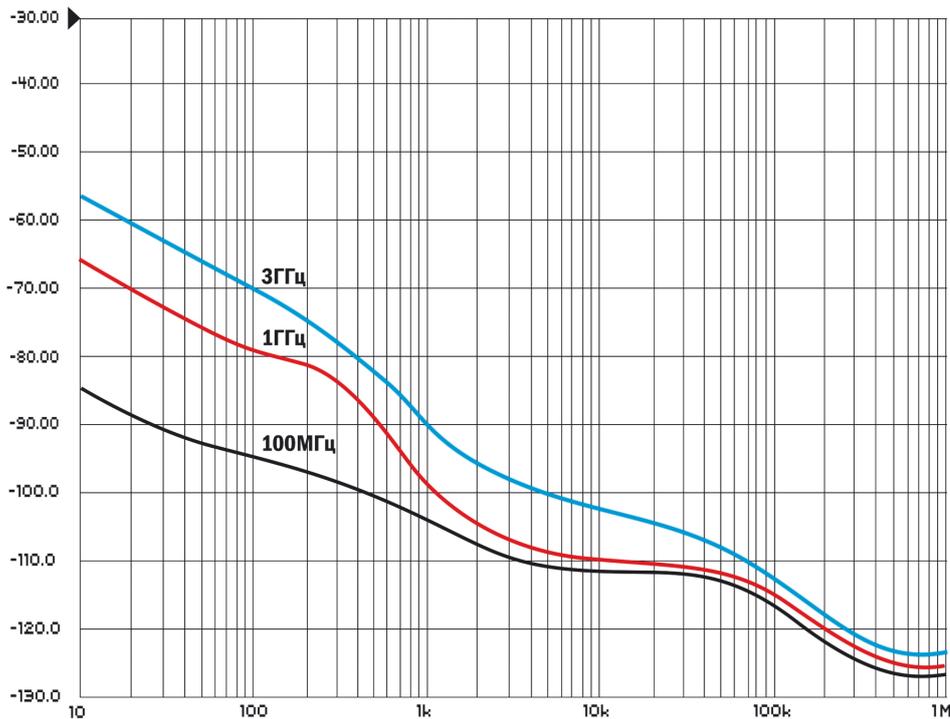


Рис. 4. Графики типичной зависимости фазовых шумов СК4-БЕЛАН 32 от несущей частоты и значения отстройки

New domestically produced models of spectrum analyzers and measuring receiver are described in this article. The detailed specifications, capabilities and advantages of spectrum analyzer СК4-BELAN 32 are represented.

РОССИЙСКАЯ СЕРИЯ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА СК4-БЕЛАН: ОТ 2,2 ГГц К 44 ГГц

RUSSIAN SPECTRUM ANALYZERS SK4-BELAN: FROM 2.2 GHz TO 44 GHz

Бельчиков С.А. к.т.н. (S. Belchikov), Бельчиков А.В. д.т.н. (A. Belchikov), ЗАО ФФ «ЭЛВИРА»

(Окончание, начало см. №2-2006)

Плодом кропотливой работы стал анализатор спектра нового поколения СК4-БЕЛАН 32 (рис. 2) на диапазон частот 9 кГц...3200 МГц, серийно выпускаемый с 2004 года и сертифицированный Госстандартом РФ в 2005 году, аналоги которого в России на сегодняшний день отсутствуют.

К достоинствам прибора следует отнести: низкий уровень собственных шумов (-150 дБм в полосе 1 Гц на частоте 1 ГГц), низкий уровень фазовых шумов (-110 дБн на 10-килогерцовой отстройке

2006 года планируется начать выпуск СК4-БЕЛАН 32 с новым термостатированным опорным источником 100 МГц, имеющим сверхнизкие фазовые шумы (-125 дБн/Гц на отстройке 100 Гц, -150 дБн/Гц на отстройке 1 кГц и -170 дБн/Гц на отстройке 10 кГц). Это должно существенно улучшить фазовые шумы анализатора спектра СК4-БЕЛАН 32 в целом. В качестве опции для СК4-БЕЛАН 32 на сегодняшний день предлагается следящий генератор, позволяющий превратить анализатор спектра в прибор для скалярного анализа четырехполосников.

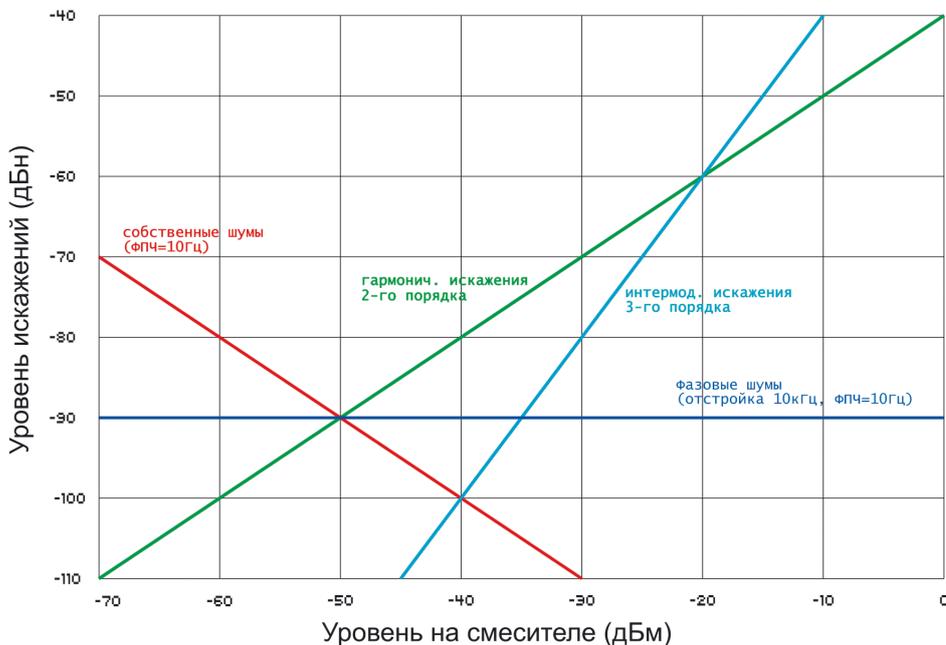


Рис. 5. Динамический диапазон СК4-БЕЛАН 32

от несущей 500 МГц), высокую разрешающую способность (возможность установки фильтра ПЧ от 1 Гц до 1 МГц с кратностью шага 1, 3, 10), высокую динамику для интермодуляционных искажений 3-го порядка (типичное значение ИПЗ +10 дБм), высокую избирательность фильтров (не хуже 5:1), наличие различных детекторов (пикового, квазипикового, СКЗ, выборки), современное развитие меню на базе Windows 98, а также умеренную, по сравнению с западными аналогами, цену. В СК4-БЕЛАН 32, как и в СК4-БЕЛАН, реализовано трехкратное преобразование частоты с использованием смесителя, работающего на 1-й гармонике гетеродина. В качестве гетеродина используется ЖИГ-генератор с диапазоном частот 4 ГГц...8 ГГц, стабилизируемый при помощи опорного источника 100 МГц. В первой половине

Основные технические характеристики прибора приведены в таблице и на рисунках 3-5.

Примеры измерений с помощью анализатора спектра СК4-БЕЛАН 32 приведены на рисунках 6-12.

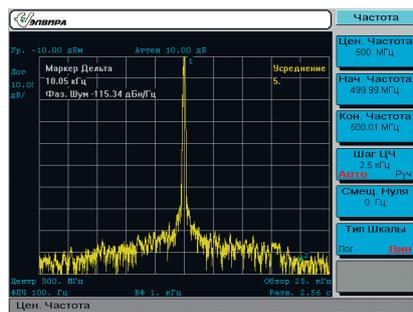


Рис. 6. Фазовые шумы анализатора спектра СК4-БЕЛАН 32 на частоте 500 МГц в полосе обзора 25 кГц

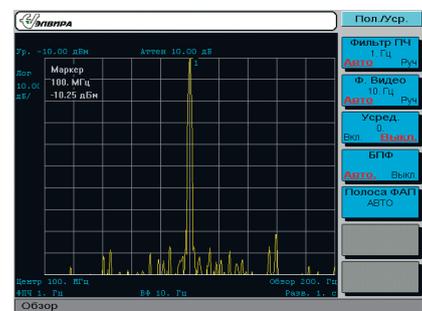


Рис. 7. Фазовые шумы анализатора спектра СК4-БЕЛАН 32 на частоте 100 МГц в полосе обзора 200 Гц

В 2005 году на базе платформы БЕЛАН 32 нашими инженерами был разработан полнодиапазонный преселектор 9 кГц...3.2 ГГц, состоящий из 11 фильтров, коммутируемых в зависимости от выбранного диапазона частот синхронно с разверткой анализатора. В блоке преселектора также установлен предварительный усилитель, позволяющий снизить собственный уровень шумов прибора на 10-12 дБ (до значения в -160 дБм на частоте 1 ГГц). Блок преселектора/предварительного усилителя превращает анализатор спектра в панорамный измерительный приемник типа

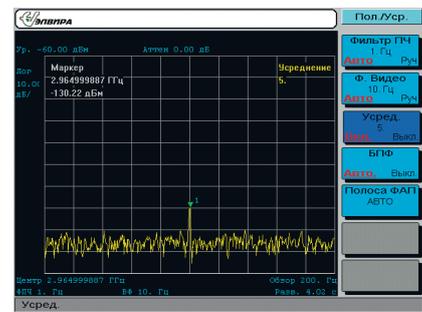


Рис. 8. Предельная чувствительность СК4-БЕЛАН 32 в стандартной комплектации, с генератора подан сигнал с уровнем -130 дБм (75 нВ) на частоте 2965 МГц

П5 (по отечественной классификации), который не имеет аналогов на российском рынке. Аналогичные измерительные приемники западных производителей (Rohde&Schwarz) оказываются дороже по цене, как минимум, в два раза. Сертификацию измерительного приемника П5-БЕЛАН 32 (рис. 13) планируется завершить в первом полугодии 2006 года. Кроме того, в конце 2005 года наша компания завершила разработку малогабаритного измерительного приемника П5-БЕЛАН 32М (также с полнодиапазонным преселектором), который не имеет аналогов ни на российском, ни

на мировом рынке. Его сертификация будет проходить параллельно с сертификацией лабораторного прибора П5-БЕЛАН 32.

Значительные усилия в 2005 году были приложены для того, чтобы на базе анализатора спектра СК4-БЕЛАН 32 выйти в сантиметровый диапазон частот. На второй квартал 2006 года запланировано начало серийного выпуска моноблочного анализатора спектра СК4-БЕЛАН 220. Как видно из названия, это

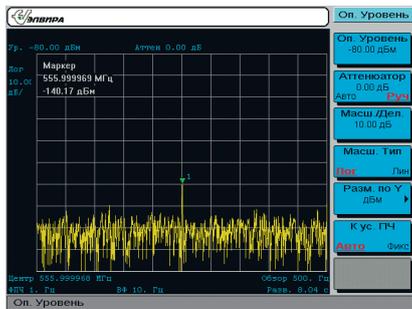


Рис. 9. Предельная чувствительность СК4-БЕЛАН 32 в комплектации с преселектором и предварительным усилителем, с генератора подан сигнал с уровнем -140 дБм (22,4 нВ) на частоте 556 МГц

будет анализатор спектра, работающий по первой гармонике гетеродина (а не на гармониковых смесителях, как отечественные анализаторы С4-85, С4-98 или импортные приборы типа Agilent 856хЕ/ЕС), с диапазоном частот до 22 ГГц. Благодаря принципу фундаментального смещения и, следовательно, малым потерям в преобразовании, ожидаются хорошие показания чувствительности: средний уровень шумов на частоте 22 ГГц должен составить не более -140 дБм в полосе ПЧ 1 Гц. Прибор будет оснащен преселектором с ЖИГ-перестраиваемой головкой для диапазона частот 2,7 ГГц...22 ГГц, что позволит ослабить помехи по зеркальному каналу приема на 70-75 дБ. В качестве гетеродина будет использоваться ЖИГ-генератор 2 ГГц...12 ГГц, стабилизируемый при помощи малошумящего опорного источника 100 МГц. Благодаря улучшению подавления гетеродина в первом смесителе (до 35-40 дБ), а также уменьшению фазо-

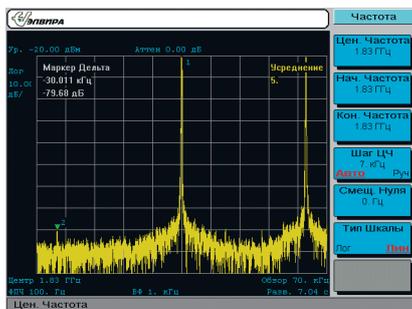


Рис. 10. Интермодуляционные искажения 3-го порядка анализатора спектра СК4-БЕЛАН 32, на открытый вход (аттенуатор 0 дБ) анализатора поданы два сигнала с уровнем -20 дБм и разносом по частоте 30 кГц, уровень искажений составляет -79 дБ, что соответствует $TOI = +19$ дБм

вых шумов прибора в ближней зоне, при наличии фильтра ПЧ 1 Гц с коэффициентом прямоугольности 5:1, ожидается, что начальную границу частотного диапазона СК4-БЕЛАН 220 можно будет отодвинуть в район 100 Гц и даже 10 Гц. До конца 2006 года ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» планирует внести СК4-БЕЛАН 220 в Госреестр. Для анализатора спектра СК4-БЕЛАН 220 уже разработана не имеющая аналогов в России логопериодическая антенна с диапазоном частот 1...26,5 ГГц. Антенна имеет КСВН <2, линейную поляризацию, коэффициент усиления 8 дБ, а также малые габариты (210×290 мм) и массу (менее 1 кг). В настоящее время антенна проходит испытания по внесению в Госреестр.

В результате анализа различных схем построения современных анализаторов спектра, нашими инженерами был сделан вывод, что анализатор спектра сантиметрового диапазона лучше всего строить на основе ЖИГ-генератора с диапазоном частот 8-18/20 ГГц с таким расчетом, чтобы первая ПЧ приходилась на 9-10 ГГц. В этом случае без использования преселектора можно перекрывать частотный диапазон до 8 ГГц, а на 1-ой гармонике гетеродина даже без умножения можно дойти до 28-30 ГГц, что гарантирует замечательную чувствительность даже на 30 ГГц. Кроме того, при условии правильной стабилизации гетеродина можно получить практически одинаковые фазовые шумы до 23-25 ГГц

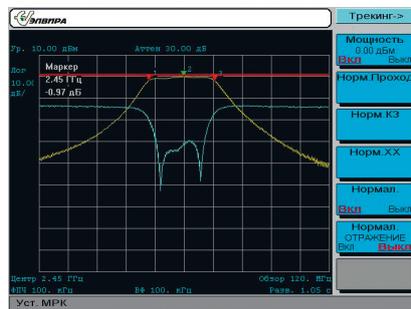


Рис. 11. Скалярные измерения АЧХ и обратных потерь на СК4-БЕЛАН 32 при помощи опционального следящего генератора

(порядка -105...-107 дБн/Гц или лучше на отстройке 10 кГц). Разумеется, подобная схема предъявляет очень высокие технологические требования к смесителям и другим узлам СВЧ тракта, таким, как усилители, коммутаторы, а также к коаксиальным разъемам и переходам. Также серьезной проблемой являются входные программируемые аттенуаторы на диапазон частот до 40 ГГц, технология производства которых в России не освоена. Однако именно архитектура, основанная на гетеродине 8-18/20 ГГц и использовании смесителей, работающих по первой гармонике гетеродина, обладает самым большим потенциалом для расширения в миллиметровый диапазон частот. Именно эта схема была применена в сериях анализаторов Tektronix 2782/84, Rohde & Schwarz FSE, задавших на Запа-



Рис. 12. Измерение фазовых шумов на СК4-БЕЛАН 32 при помощи специализированного ПО, входящего в стандартную комплектацию

де промышленный стандарт в последнем десятилетии прошлого века, а также в наиболее перспективной разработке компании Anritsu — векторном анализаторе сигналов MS2781A. К середине 2007 года мы планируем освоить выпуск анализатора спектра с улучшенными параметрами, который в одной развертке



Рис. 13. Измерительный приемник П5-БЕЛАН 32

будет перекрывать частотный диапазон 9 кГц...43 ГГц-44 ГГц в коаксиальном тракте 2,92 мм (СК4-БЕЛАН 430). Анализатор спектра будет оснащен преселектором 7 ГГц...46 ГГц и будет стоить не более 40 000 долларов США. Отечественные аналоги такого анализатора на сегодняшний день отсутствуют, импортные аналоги от Agilent Technologies и Rohde & Schwarz стоят около 75 000...80 000 долларов США. Для диапазона 9 кГц...7 ГГц планируется создать преселектор из 11-12 коммутуемых фильтров, что позволит превратить прибор в измерительный приемник класса П5. Измерительные приемники до 40 ГГц в мире производит только Rohde & Schwarz по заоблачным ценам свыше 100 000 долларов США, причем приборы с диапазоном выше 31 ГГц в Россию без лицензии не поставляются.

Кроме того, в ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» начались испытания лабораторного образца генератора сигналов для диапазона частот 9 кГц...3200 МГц, который должен по параметрам максимально приблизиться к лучшим западным образцам. Серийный выпуск генераторов сигналов предполагается начать в четвертом квартале 2006 года.

New domestically produced models of spectrum analyzers and measuring receiver are described in this article. The detailed specifications, capabilities and advantages of spectrum analyzer CK4-BELAN 32 are represented.