

Рис. 17. Первый гетеродин в СК4-БЕЛАН 240 на частоте 4021,4 МГц

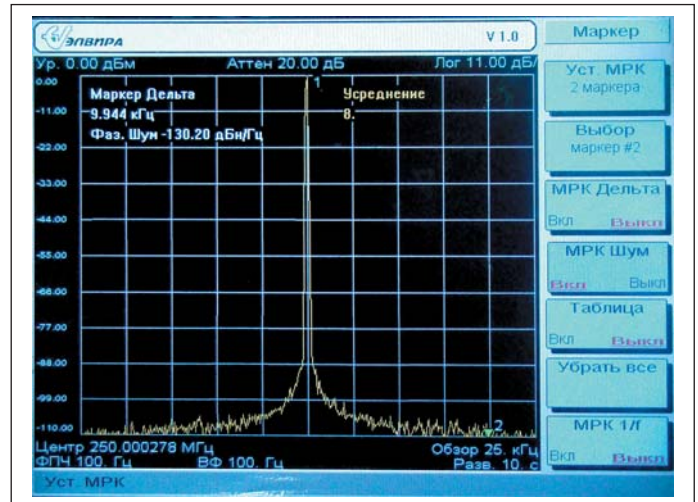


Рис. 19. Предельные фазовые шумы СК4-БЕЛАН 240 на частоте 250 МГц в полосе обзора 25 кГц

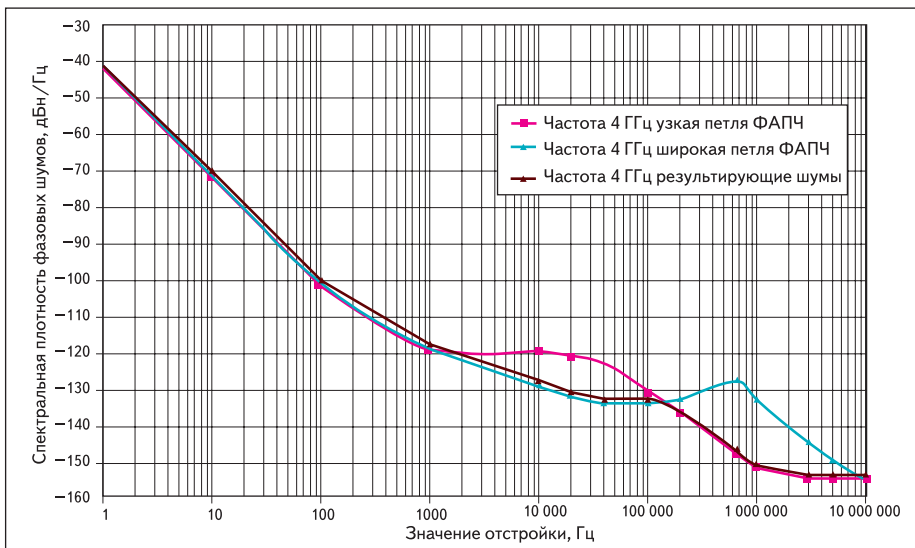


Рис. 18. Оптимизация фазовых шумов за счет изменения полосы петли ФАПЧ

цесс коммутации различных видов петли, как правило, остается практически незаметным. Изменение фазовых шумов в зависимости от коммутации петли ФАПЧ показано на рис. 18. Эффективные фазовые шумы, которые может увидеть пользователь в автоматическом режиме, показаны на результирующем графике.

Измерительные возможности малошумящего анализатора спектра СК4-БЕЛАН 240, достигнутые благодаря использованию усовершенствованного синтеза

Описанное схемотехническое решение легло в основу частотного синтеза новейшего анализатора спектра ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» СК4-БЕЛАН 240/280 на диапазон частот 9 кГц – 24 ГГц (28 ГГц). Предельные фазовые шумы, отображаемые прибором при подаче

на вход спектрально чистого сигнала с частотой 250 МГц, показаны на рис. 19.

Достигнутые результаты с уверенностью позволяют говорить о том, что по чистоте спектра собственных гетеродинов СК4-БЕЛАН 240 не уступит ни одному из коммерчески доступных анализаторов спектра, за исключением только, пожалуй, Rohde & Schwarz FSU/FSQ/FSUP/ESU¹. Большинство же из известных спектроанализаторов (например, являющиеся сегодня де-факто промышленным стандартом Agilent PSA и MXA, любой из анализаторов производства компаний Anritsu, Aeroflex) будут по вносимым фазовым шумам на 5–10 дБ хуже, чем СК4-БЕЛАН 240/280, в зависимости от несущей частоты и значения отстройки.

¹ На некоторых частотах СК4-БЕЛАН 240/280 будет незначительно уступать по фазовым шумам FSU26 (например, на частотах до 1 ГГц), на других же (например, на частотах выше 4 ГГц) существенно его превосходить.

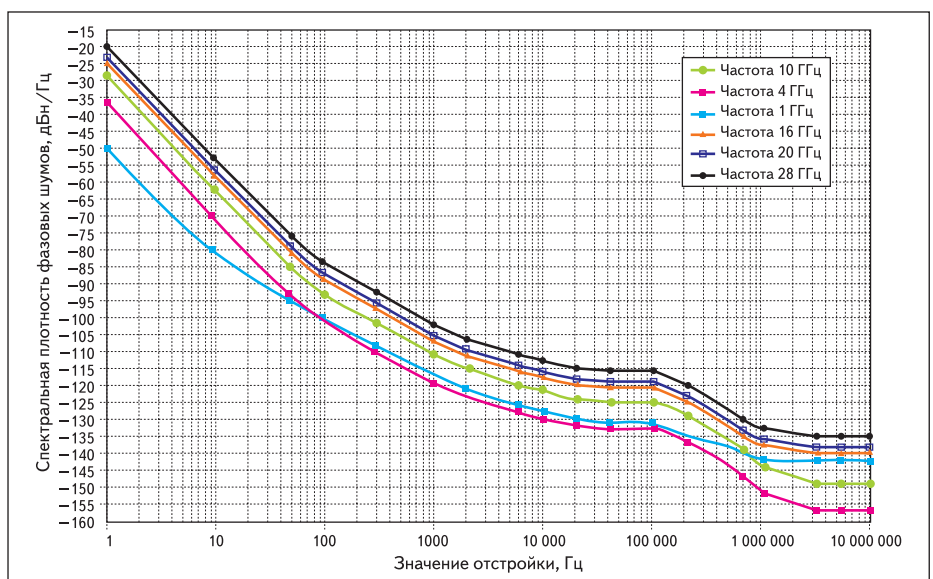


Рис. 20. Фазовые шумы СК4-БЕЛАН 240/280 для разных входных частот

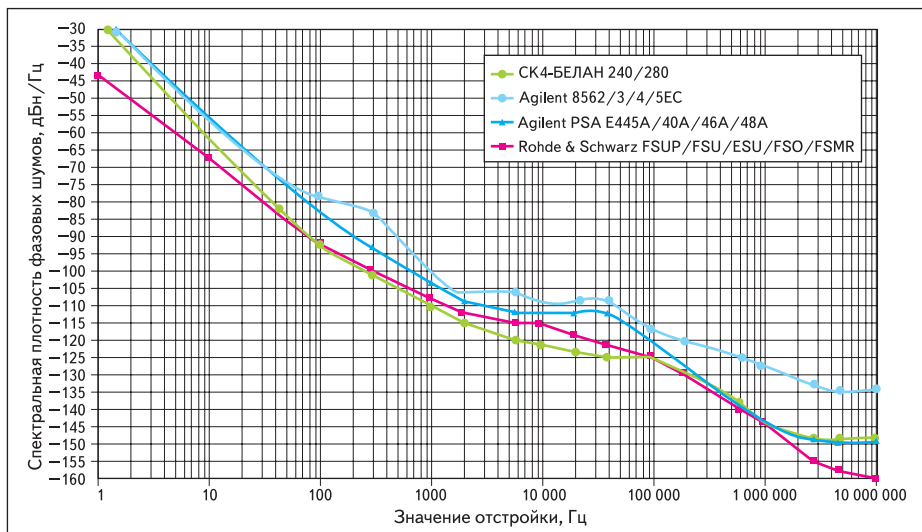


Рис. 21. Фазовые шумы СК4-БЕЛАН 32 и лучших анализаторов спектра на частоте 10 ГГц

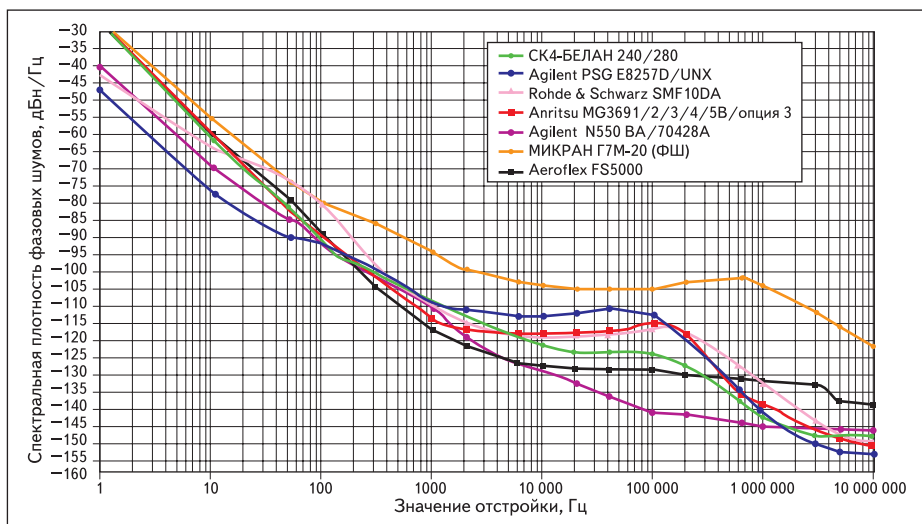


Рис. 22. Фазовые шумы СК4-БЕЛАН 32 и лучших генераторов сигнала на частоте 10 ГГц

На рис. 20 показан типичный уровень фазовых шумов для разных частот, приведенный к входу СК4-БЕЛАН 240/280. Графики фазовых шумов даны с учетом коммутации петли ФАПЧ для оптимизации спектральной чистоты сигнала в зависимости от выбранной пользователем полосы обзора. При оценке эффективного уровня фазовых шумов, вносимых анализатором спектра, надо иметь в виду следующие моменты, связанные с его архитектурой. При РЧ-сигналах до 3,3 ГГц в СК4-БЕЛАН 240/280 используется трехкратное преобразование по частоте, то есть его первый гетеродин настроен выше радиосигнала на величину ПЧ = 4421,4 МГц и будет иметь фазовый шум, соответствующий данной, более высокой, частоте. Например, при РЧ-сигнале, равном 1 ГГц, первый гете-

родин СК4-БЕЛАН 240/280 будет настроен на частоту 5421,4 МГц и иметь фазовые шумы порядка -125 дБн/Гц на отстройке 10 кГц. Точно такой же фазовый шум прибор будет иметь и на входной частоте 5 ГГц для данной отстройки, поскольку в этом диапазоне используется двукратное преобразование, где ПЧ = 421,4 МГц, а частота гетеродина вновь составляет 5,4214 ГГц. А вот в диапазоне входных частот от 3,3 до 5 ГГц СК4-БЕЛАН 240/280 будет иметь фазовые шумы даже ниже, чем при входной частоте 1 ГГц (это обусловлено более низкой частотой настройки гетеродина). Лучшие фазовые шумы СК4-БЕЛАН 240/280 можно будет наблюдать на входной частоте 3,31 ГГц (это начальная частота его гетеродина). Важно отметить, что на малых отстройках (до 300 Гц от несущей) при входных ча-

стотах до 1,5 ГГц в СК4-БЕЛАН 240/280 будет иметь место описанное выше явление когерентного вычищения фазовых шумов первого гетеродина сигналом 4 ГГц второго гетеродина. То есть при входных частотах до 1,5 ГГц фазовые шумы во фликкер-зоне (отстройки до 300 Гц) будут лучше, чем на частотах 3,3–5,5 ГГц, где используются те же самые частоты гетеродина, но работает двукратное преобразование. Кроме того, важно отметить, что на частотах до 3,3 ГГц при дальних отстройках фазовые шумы будут хуже, чем в диапазоне двукратного преобразования, поскольку они определяются фазовыми шумами второго гетеродина 4 ГГц, который имеет на отстройке 1 МГц фазовый шум хуже, чем ЖИГ-генератор.

На рис. 21 показано сравнение фазовых шумов СК4-БЕЛАН 240/280 на частоте 10 ГГц с фазовыми шумами лучших анализаторов спектра.

На рис. 22 показано сравнение фазовых шумов СК4-БЕЛАН 240/280 на частоте 10 ГГц с фазовыми шумами лучших малошумящих генераторов.

Реализованное в СК4-БЕЛАН 240/280 схемотехническое решение значительно расширяет сферу применения этого прибора. Помимо традиционных задач, которые обычно ставятся перед анализатором спектра (исследование спектрального состава и основных параметров сигналов аналоговых и цифровых радиопередающих устройств), СК4-БЕЛАН 240/280 может быть рекомендован для решения ряда измерительных задач, которые раньше были просто нереальны для анализатора спектра: например, для прямой оценки в диапазоне выше 3,3 ГГц фазовых шумов малошумящих синтезированных генераторов (таких как Agilent E8257D-520, Anritsu MG3692B). Кстати, до настоящего времени задача проверки фазовых шумов малошумящих синтезаторов в нашей стране метрологически не обеспечена, поскольку специализированные системы, имеющие высокую чувствительность по фазовому шуму, в Государственный реестр не включены, а указанные в этом документе анализаторы спектра «увидеть» фазовый шум малошумящего генератора, как правило, не могут. Мы надеемся, что внесение в Госреестр СК4-БЕЛАН 240/280 позволит, в известной степени, восполнить данный пробел.

Приведем несколько практических примеров. Допустим, что нам нужно измерить фазовый шум синтезированного генератора SME06 (5 кГц – 6 ГГц). Возьмем частоту 3,31 ГГц² и подадим ее на вход нескольких анализаторов спектра. Анализатор спектра Rohde & Schwarz FSU26 первого поколения³ на данной частоте измеряет фазовый шум в $-111,29$ дБн/Гц (рис. 23).

Прецизионный измерительный приемник Rohde & Schwarz ESIB40, также имеющий один из самых низких шумов в отрасли, регистрирует фазовый шум в $-112,77$ дБн/Гц (рис. 24).

² На самом деле можно взять любую частоту, которая будет выше диапазона частот анализатора спектра, в котором осуществляется трехкратное преобразование, то есть выше 3,3 ГГц.

³ В моделях второго поколения, с серийными номерами старше 2xxxxx, компания Rohde & Schwarz оптимизировала схему стабилизации гетеродинов прибора и получила очень низкие фазовые шумы в -135 дБн/Гц на частотах до 1 ГГц. На несущих частотах выше 3,3 ГГц второе поколение приборов FSU имеет фазовые шумы несколько хуже, чем СК4-БЕЛАН 240/280. К сожалению, на момент опыта FSU второго поколения в нашем распоряжении не было.

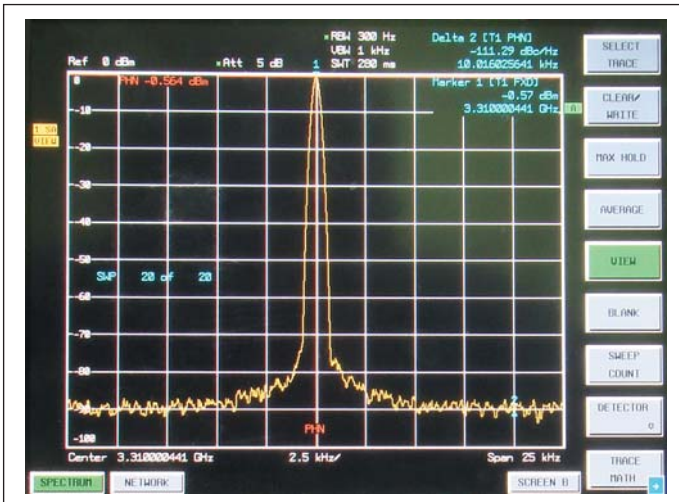


Рис. 23. Измерение фазовых шумов генератора SME06 на частоте 3,31 ГГц при помощи анализатора спектра Rohde & Schwarz FSU26

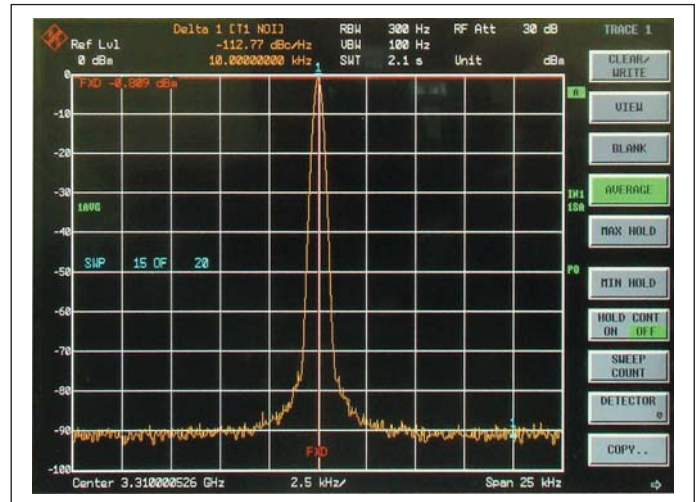


Рис. 24. Измерение фазовых шумов генератора SME06 на частоте 3,31 ГГц при помощи измерительного приемника Rohde & Schwarz ESIB40

СК4-БЕЛАН 240 «не соглашается с авторитетными коллегами» и измеряет величину в $-118,95$ дБн/Гц (рис. 25).

Какой же прибор измерил настоящие фазовые шумы? Для верификации результатов воспользуемся специализированным измерителем фазовых флуктуаций (анализатором источников сигнала) Agilent E5052A. График фазового шума, измеренного на данном приборе, показан на рис. 26.

Как видно, показания Agilent E5052A согласуются с результатом СК4-БЕЛАН 240. Обращаем внимание на график бледно-желтого цвета, также приведенный на экране E5052A. Это измеренный при помощи E5052A фазовый шум сигнала третьей ПЧ 21,4 МГц, взятого с задней панели СК4-БЕЛАН 240, когда на вход ему подается 3,31 ГГц с SME06. Другими словами, на графике бледно-желтого цвета показано, как СК4-БЕЛАН 240 работает в режиме переносчика частоты. Важно, что графики фазового шума сигнала 3,31 ГГц,

снесенного анализатором СК4-БЕЛАН 240 на 21,4 МГц и измеренного Agilent E5052A напрямую, совпадают на большей части отстройек.

Для того чтобы рассеять сомнения, что СК4-БЕЛАН 240/280 может измерять на частотах выше 3,3 ГГц и более низкие, чем -119 дБн/Гц, фазовые шумы, проведем еще один эксперимент. В качестве спектрально чистого синтезатора мы будем использовать первый гетеродин анализатора спектра СК4-БЕЛАН 240 № 2. Настроим данный гетеродин на частоту 3,9 ГГц и подадим этот сигнал на вход СК4-БЕЛАН 240 № 1. В результате мы получаем спектрограмму, изображенную на рис. 27. Видно, что прибор позволяет измерить на отстройке 20 кГц фазовый шум в -135 дБн/Гц (на отстройке 10 кГц в -128 дБн/Гц). Такой чувствительности по фазовому шуму должно хватать для прямой оценки фазовых шумов 90% коммерчески доступных синтезаторов. Лучшая чувствитель-

ность по фазовому шуму в СК4-БЕЛАН 240 может быть получена при использовании цифровых фильтров 300 Гц, 1 и 3 кГц (причем это должны быть не БПФ-фильтры). Это связано с тем, что динамика более узких цифровых фильтров в блоке цифровой обработки не возрастает в соотношении $10\log$ от коэффициента сужения полосы.

Для верификации результата измерения приведен фазовый шум того же сигнала (1-й гетеродин СК4-БЕЛАН 240 № 2 на частоте 3,9 ГГц), измеренный на специализированном приборе Agilent E5052A (рис. 28).

Следующий эксперимент должен подтвердить сверхнизкие фазовые шумы СК4-БЕЛАН 240 на частотах выше 10 ГГц. Согласно рис. 20, в СК4-БЕЛАН 240 мы должны получить на частоте 12 ГГц фазовый шум ниже -120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц. Малошумящие СВЧ-генераторы Agilent E8257D-UNX или Anritsu MG3690B-03, согласно спецификациям производителей, имеют фазовый шум в -114 дБн/Гц

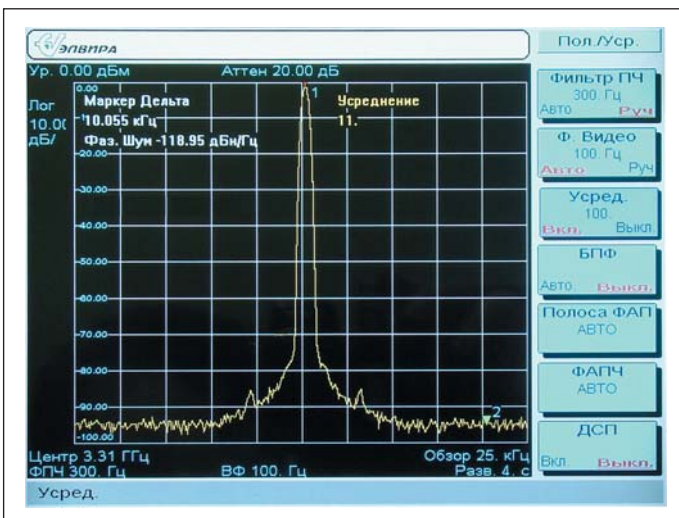


Рис. 25. Измерение фазовых шумов генератора SME06 на частоте 3,31 ГГц при помощи анализатора спектра СК4-БЕЛАН 240

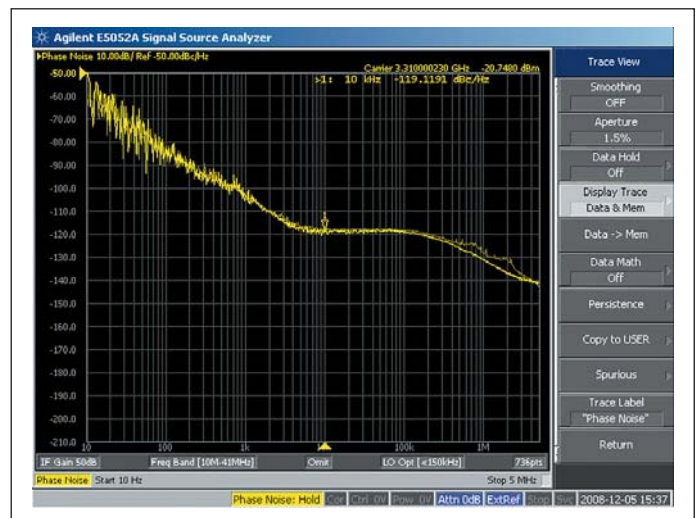


Рис. 26. Измерение фазовых шумов генератора SME06 на частоте 3,31 ГГц при помощи анализатора источников сигнала Agilent E5052A

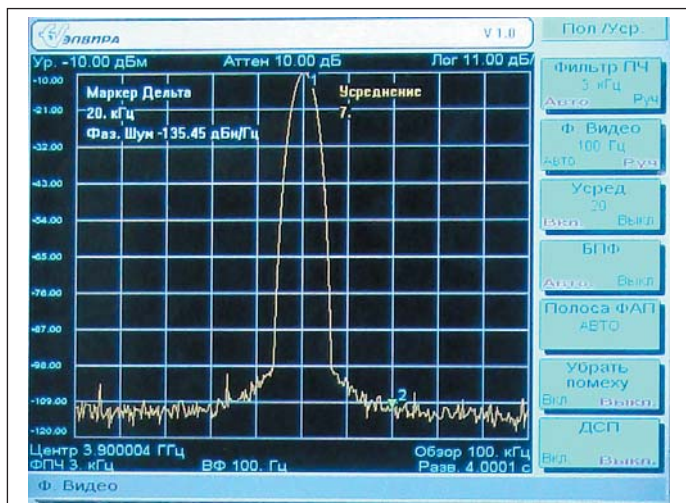


Рис. 27. Фазовый шум сверхчистого сигнала на частоте 3,9 ГГц, измеренный при помощи СК4-БЕЛАН 240

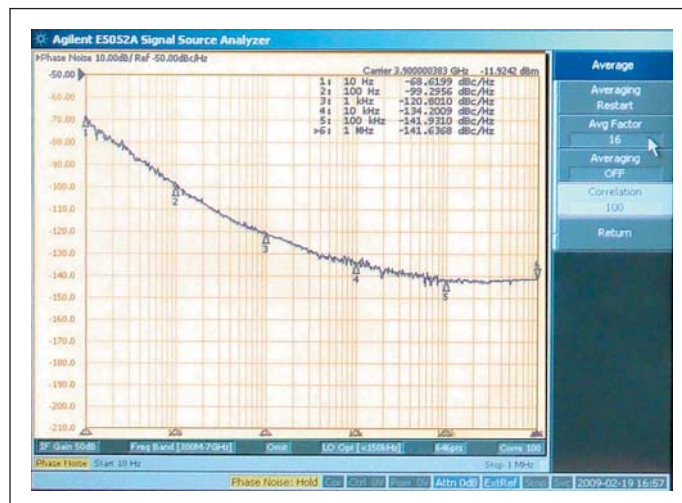


Рис. 28. Фазовый шум сверхчистого сигнала, измеренный при помощи Agilent E5052A в режиме 100 кросс-корреляций

на отстройке 10 кГц для несущих порядка 12 ГГц. Следовательно, они не смогут «заставить» СК4-БЕЛАН 240 показать его собственные фазовые шумы. Поэтому для данного эксперимента мы опять будем использовать как малозумящий генератор синтезированный гетеродин от анализатора СК4-БЕЛАН 240 № 2. При подаче сигнала 12 ГГц на вход первого СК4-БЕЛАН 240, который используется как измеритель фазовых шумов, мы получаем спектрограмму, приведенную на рис. 29.

Данную спектрограмму сохраним в памяти анализатора спектра и теперь подадим ему на вход сигнал той же частоты с малозумящего генератора Agilent E8257D-UNX, который является своего рода стандартом низкого фазового шума в отрасли. Результат с наложением двух спектрограмм показан на рис. 30.

Видно, что измерение фазового шума генератора E8257D-UNX на частоте 12 ГГц при помощи СК4-БЕЛАН 240 согласуется со спецификацией Agilent: измеренное значение со-

ставляет -114 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущей 12 ГГц. Также видно, что порог собственных фазовых шумов на данной частоте, зафиксированный в предыдущем эксперименте, у СК4-БЕЛАН 240 лежит на 6 дБ ниже. Это позволяет ему измерять фазовый шум Agilent E8257D-UNX прямым способом: возможность, которой не имеет ни один из коммерчески доступных сегодня анализаторов спектра класса high-end.

На рис. 31, 32 показано панорамное измерение фазовых шумов генератора Agilent E8257D-520-UNX на частоте 10 ГГц при помощи прикладного программного обеспечения по измерению фазового шума для СК4-БЕЛАН 240, а также при помощи специализированной системы измерения фазовых флуктуаций Agilent E5500. На приведенных графиках видно, что в области отстроек от 2 до 100 кГц результаты измерений, выполненных СК4-БЕЛАН 240 и системой E5500, согласуются. В области отстроек более 100 кГц

чувствительность по фазовому шуму СК4-БЕЛАН 240 ограничивается коэффициентом шума СВЧ-тракта прибора. Эта проблема может быть решена за счет использования опционального предварительного усилителя. В области отстроек менее 1 кГц СК4-БЕЛАН 240 не может корректно измерить фазовый шум E8257D-520-UNX из-за того, что у данного генератора есть дополнительное кольцо ФАПЧ от малозумящего опорного генератора 10 МГц, которое позволяет дополнительно оптимизировать фликкер-шум. ЗАО ПФ «ЭЛВИРА» планирует реализовать подобную дополнительную петлю ФАПЧ от малозумящего генератора 10 МГц в качестве опции 003 (улучшенный фазовый шум во фликкер-зоне) к СК4-БЕЛАН 240.

Из описанных опытов следует вывод, что на частотах выше 3,3 ГГц СК4-БЕЛАН 240/280 может заменить специализированную систему анализа фазовых шумов (например, Agilent E5052A/E5500), работающую по прин-

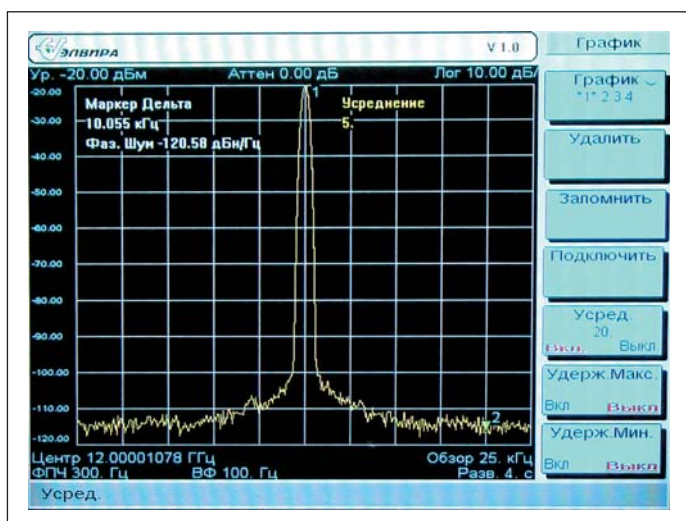


Рис. 29. Измерение фазовых шумов спектрально чистого сигнала на частоте 12 ГГц при помощи СК4-БЕЛАН 240

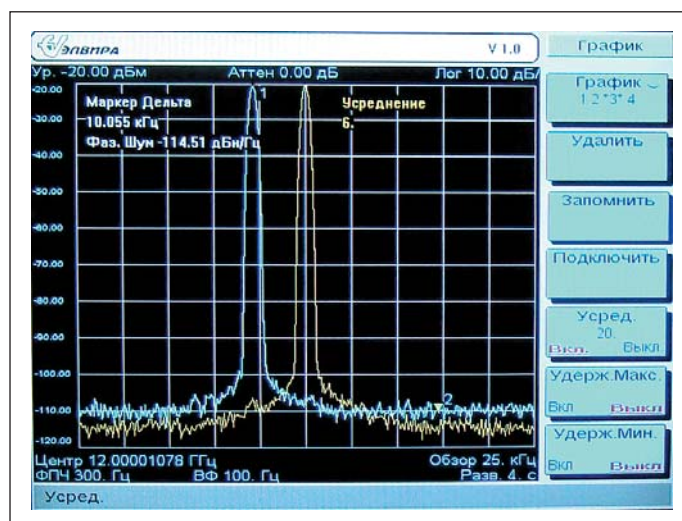


Рис. 30. Измерение фазовых шумов генератора сигнала Agilent E8257D-520-UNX на частоте 12 ГГц в полосе обзора 25 кГц при помощи СК4-БЕЛАН 240

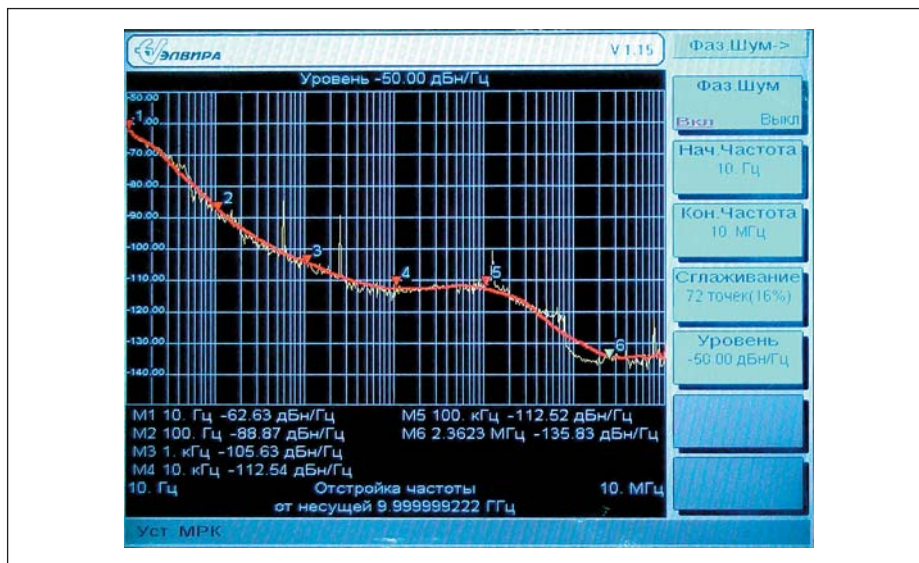


Рис. 31. Панорамное измерение фазовых шумов генератора сигнала Agilent E8257D-520-UNX на частоте 10 ГГц на отстройках от 10 Гц до 10 МГц при помощи прикладного программного обеспечения СК4-БЕЛАН 240

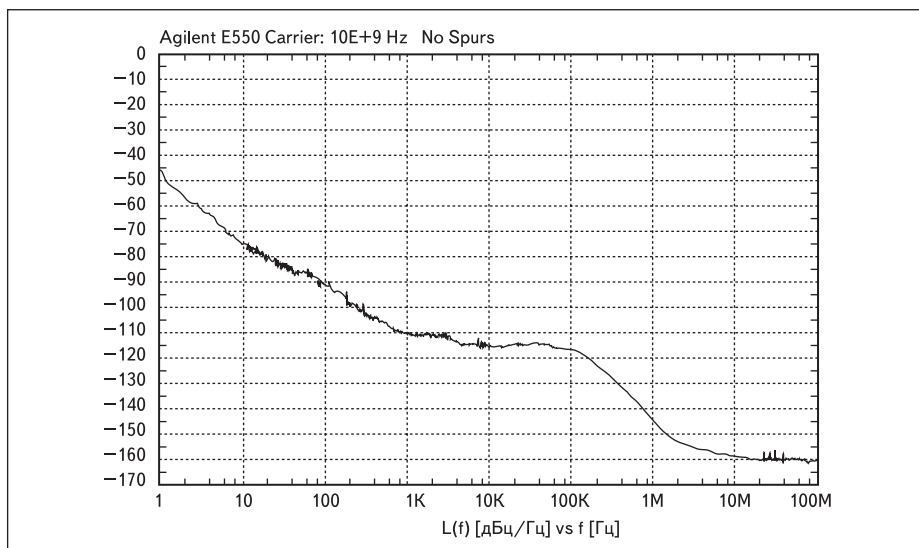


Рис. 32. Панорамное измерение фазовых шумов генератора сигнала Agilent E8257D-520-UNX на частоте 10 ГГц на отстройках от 10 Гц до 10 МГц при помощи специализированной high-end системы Agilent E5500

ципу фазового детектора и имеющую стоимость в 3–4 раза выше, чем СК4-БЕЛАН 240/280⁴. Кроме того, анализатор СК4-БЕЛАН 240/280 может быть рекомендован к использованию в качестве сверхмалозумящего переносчика частоты исследуемого сигнала диапазона 7–24 ГГц (28 ГГц) на ПЧ 21,4 МГц или 421,4 МГц и работы в комплекте с прибором E5052A (как замена даунконвертора Agilent E5053A). Еще более перспективным представляется создание на основе первого гетеродина СК4-БЕЛАН 240/280 синтезированного генератора сигналов типа Г7, который по фазовым

шумам будет превосходить все известные импортные и отечественные аналоги, а также

линейки специализированных переносчиков частоты класса РЧ-5 на диапазоны 3–26 ГГц и 26–40 ГГц.

Заключение

В данной статье были проанализированы разные способы построения синтезированных гетеродинов на примере различных моделей анализаторов спектра СК4-БЕЛАН (СК4-БЕЛАН 22, СК4-БЕЛАН 32/003, СК4-БЕЛАН 240/280).

Описано несколько способов оптимизации фазовых шумов синтезированных гетеродинов различного уровня сложности — от бюджетного до high-end.

Приведены экспериментальные результаты оценки характеристик фазового шума всех описанных схемотехнических решений, которые сегодня используются в анализаторах СК4-БЕЛАН.

Полученные результаты позволяют говорить об уникально низком уровне фазовых шумов СК4-БЕЛАН 240/280 в диапазоне 3,3–24 ГГц и рекомендовать его в качестве СВЧ-измерителя фазовых шумов малозумящих синтезированных генераторов. ■

Литература

1. Манасевич В. Синтезаторы частот. Теория и проектирование. М.: Связь, 1979.
2. Browne J. Frequency Synthesizers Tune Communications Systems. Microwaves & RF, 2006.
3. Browne J. Synthesizers Squeeze Into Smaller Spaces. Microwaves & RF, 2008.
4. Rohde U. Microwave and Wireless Synthesizers: Theory and Design. John Wiley & Sons, 1997.
5. Gardner F. Phaselock Techniques. John Wiley & Sons, 2005.
6. Egan W. Frequency Synthesis by Phase Lock. John Wiley & Sons, 1999.
7. Chenakin A. Building a Microwave Frequency Synthesizer // Summit Technical Media, LLC, High Frequency Electronics, May – September, 2008.
8. Бельчиков С. Фазовый шум: как спуститься ниже –120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц, или Борьба за децибелы // Компоненты и технологии. 2009. № 5.

⁴ Прибор Agilent E5052A, широко известный в кругу инженеров, специализирующихся на проектировании малозумящих источников сигнала, может «увидеть» фактические фазовые шумы первого гетеродина СК4-БЕЛАН 240/280 только в режиме кросс-корреляций, при котором изначально предполагается, что объект измерения по шумам чище, чем встроенные в E5052A сверхчистые генераторы.