

# Измерения фазовых шумов импульсных сигналов с использованием анализаторов фазового шума R&S FSWP

## Часть 1

**Кирилл Румянцев** (kirill.rumyantsev@rohde-schwarz.com),  
**Николай Лемешко** (nlem83@mail.ru)

В статье рассматриваются вопросы измерения фазовых шумов сигналов с импульсной модуляцией, широко применяемых в радиолокации. В первой части проанализированы их спектральные особенности и теоретические ограничения, определяемые импульсным режимом работы устройств. Оценена зависимость параметров шума от характеристик модулирующих импульсов. Рассмотрен метод цифровой фазовой демодуляции с кросс-корреляционной обработкой, применяемый для измерения фазового шума и алгоритмы его реализации.

### Введение

В настоящее время методы цифровой обработки сигналов получили широкое распространение за счёт своей универсальности и повышенной помехоустойчивости, а также широких возможностей формализации алгоритмов обработки. Эволюция современных беспроводных систем связи требует включения всё большего количества цифровых узлов и наложения всё более жёстких требований по спектральной эффективности кодирования информации. В то же время прогресс в создании широкополосных радиотрактов дал новый виток развития радиолокации, причём современные радиолокационные системы стараются извлекать больше информации о целях и их траекториях, обеспечивать

возможность отслеживания медленно движущихся целей, таких как автомобили и пешеходы, на фоне помех.

Как для систем связи, так и для радиолокационных систем одним из основных параметров, ограничивающих производительность системы, является фазовый шум. Разработка современных и всё более совершенных радиосистем требует обязательного учёта влияния фазовых шумов генераторов и передатчиков. Важно подчеркнуть, что в этом, как и во многих других направлениях радиотехники, развитие средств измерений следует за потребностями практики.

Настоящая статья, основанная на материалах Rohde & Schwarz [1], направлена на освещение вопроса о способах измерения фазовых шумов

импульсных сигналов, в первую очередь используемых в радиолокации. Рассматриваются функциональные возможности и практики применения анализатора фазовых шумов R&S FSWP.

### Импульсные сигналы на несущей частоте

Видеоимпульсы, которым соответствует нулевая несущая частота, мало применимы для целей радиолокации, в первую очередь из-за необходимости использовать антенны больших габаритов и крайне слабой направленности [2]. В общем случае в радиолокационных станциях используются сигналы со специальными видами модуляции, например с линейной частотной модуляцией. Однако в контексте измерения фазовых шумов далее будет рассмотрен только наиболее простой вид модуляции.

Сигналы и, соответственно, излучения импульсного характера могут быть получены включением и выключением генератора несущей, но это не обеспечивает непрерывность фазы, и она становится случайной для каждого импульса. Это не позволяет использовать такое решение в доплеровских РЛС и проводить измерения фазового шума источников с помощью фазовых или синхронных детекторов. Так как для фазового детектора необходим стабильный опорный сигнал, с которым сравнивается измеряемый сигнал, не представляется возможным измерение фазового шума при значительном изменении фазы каждого импульса.

При рассмотрении процесса модуляции необходимо помнить, что умножение импульсного сигнала и ВЧ-несущей во временной области соответствует свёртке спектров в частотной области. Спектр последовательности импульсов представляет собой последовательность гармоник, отстоящих друг от друга на частоту  $F$  повторения импульсов (ЧПИ). При амплитудной модуляции несущей импульсным сигналом сформирован спектр, симметричный относительно частоты несущей, его спектральные линии разнесены

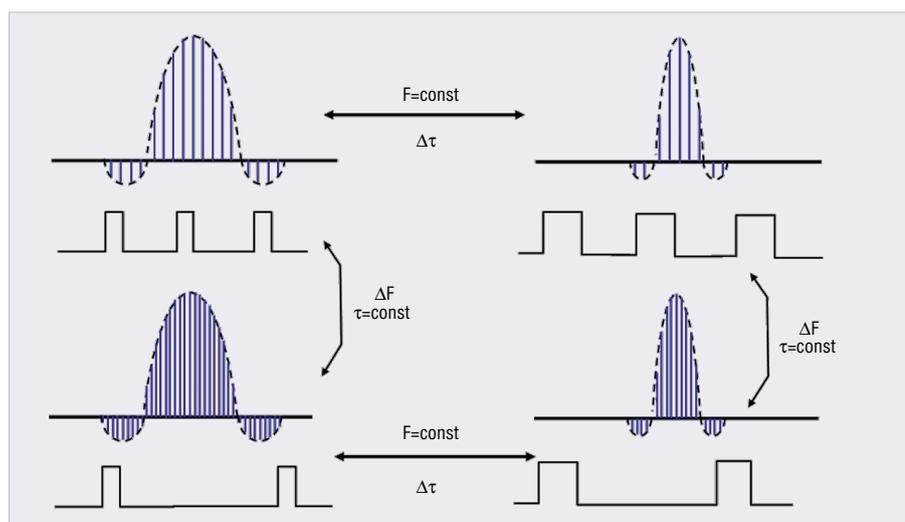


Рис. 1. Изменения спектра импульсного сигнала при изменении  $F$  и  $\tau$

на  $n \times F$ , где  $n$  – натуральное число. Амплитуда спектральных линий (см. рис. 1) будет иметь ожидаемую огибающую вида  $\sin(x)/x$ , нули которой возникают в точке  $1/\tau$ , где  $\tau$  – длительность импульса.

При увеличении ЧПИ увеличивается расстояние между спектральными линиями. Если ЧПИ очень низкая, спектральные линии будут расположены близко друг к другу и могут помешать доплеровской обработке. Аналогично и при измерениях фазовых шумов: увеличение интервала между частотными линиями увеличивает возможности измерения фазового шума между спектральными линиями с точки зрения значения максимально доступной отстройки от несущей.

### Фазовый шум периодических сигналов с импульсной модуляцией

При амплитудной модуляции формируется спектр с симметричными относительно несущей частоты боковыми полосами, включающими спектральные линии с интервалом  $F$ . Дополнительно каждая линия в спектре также содержит фазовый шум несущей, наложенный в процессе свёртки. Этот добавленный шум на каждой спектральной линии можно легко выделить, изучив импульсный спектр сигнала с импульсной модуляцией на анализаторе спектра при полосе разрешения  $RBW \ll F$ , при этом увеличив полосу обзора до отображения нескольких отдельных спектральных линий.

На рисунке 2 показан фрагмент спектра несущей с частотой 1 ГГц, модулированной импульсным сигналом с длительностью импульса 10 мкс и  $F = 10$  кГц. Здесь хорошо различимы боковые полосы фазового шума несущей. Можно заметить, что фазовый шум несущей накладывается на каждую спектральную линию. Также видно, что U-образная кривая формируется между каждой линией спектра. Ещё из рисунка можно увидеть, что для отстройки частоты больше, чем  $F/2$ , новая информация о фазовом шуме отсутствует, и его измерения проводятся, как правило, с отстройкой частоты от несущей, не превышающей указанного значения. В классическом случае при измерении фазовых шумов после фазового детектора ставят фильтр нижних частот. Частота среза этого фильтра меньше  $F/2$ , что гарантирует проведение измерений фазовых шумов в корректном диапазоне отстроек частоты.

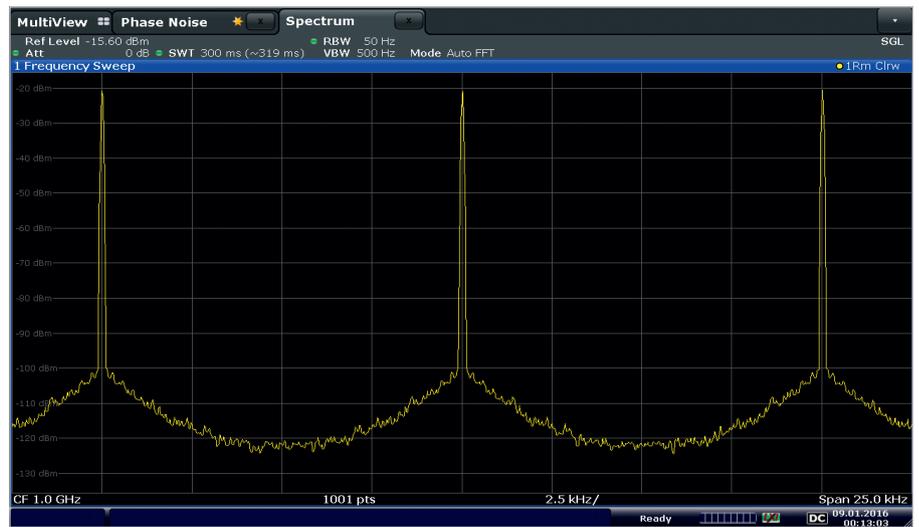


Рис. 2. Фрагмент спектра несущей с импульсной модуляцией

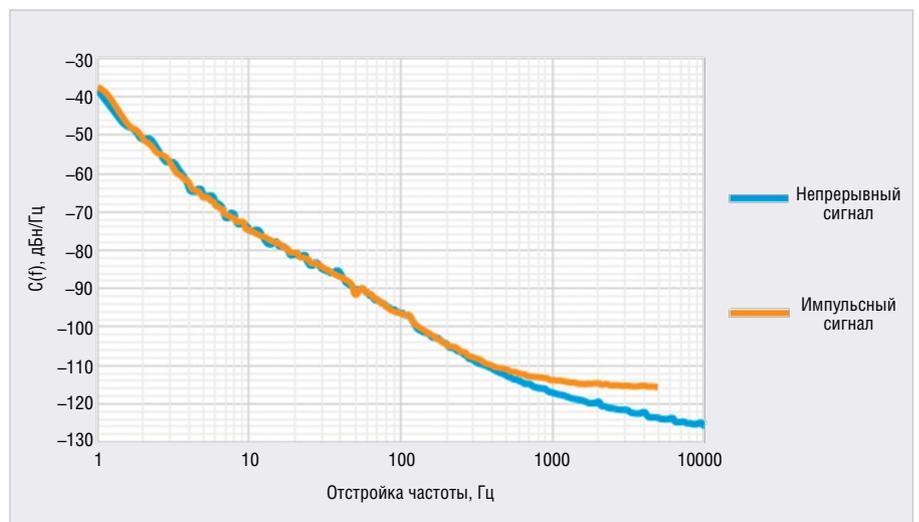


Рис. 3. Фазовый шум непрерывного и импульсного сигналов

### Различие между фазовым шумом непрерывного и импульсного сигналов

При сравнении фазового шума для сигнала с импульсной модуляцией и без импульсной модуляции для одного и того же источника оказывается, что фазовый шум в первом случае выше, особенно при больших отстройках от несущей частоты. На рисунке 3 представлен график, на котором построена зависимость фазового шума от частотной отстройки.

Кривые на рисунке 3 получены путём измерения фазового шума с помощью анализатора фазовых шумов FSWP компании Rohde & Schwarz. Использовалась импульсная модуляция с  $\tau = 10$  мкс и  $F = 10$  кГц. Максимальная отстройка частоты для измерения импульсного сигнала равна  $F/2 = 5$  кГц. Фазовый шум импульсного сигнала начинает отличаться от фазового шума непрерывного сигнала,

начиная с отстройки частоты порядка 400 Гц. Фазовый шум примерно на 8 дБ выше при отстройке  $F/2$ . Сравнивая рисунки 2 и 3, можно заметить схожую форму кривой.

Как отмечалось ранее, при амплитудной модуляции формируются две боковые полосы выше и ниже несущей. Свёртка всех отдельных спектров приводит к появлению всех возможных сумм и разностей несущей частоты, всех гармоник модулирующего сигнала. Если боковые полосы фазового шума присутствуют в несущей, то спектр импульсного сигнала сворачивается со спектром несущей и её шумовыми боковыми полосами.

Процесс модуляции накладывает шумовые боковые полосы несущей на каждую спектральную линию импульса так, как это пояснено на рисунках 4 и 5.

Для фиксированной длительности модулирующего импульса увеличе-

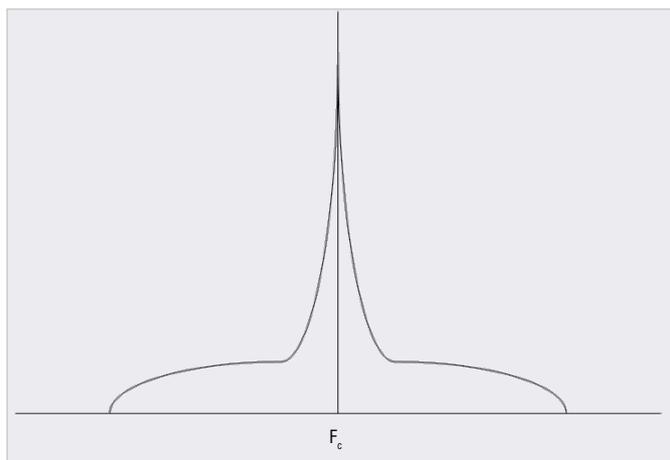


Рис. 4. Спектр несущей и её боковые шумовые полосы

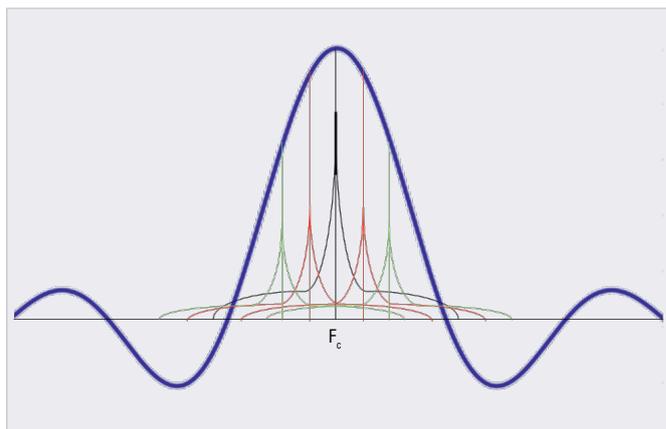


Рис. 5. Спектр шумовых боковых полос, наложенных на каждую спектральную линию



Рис. 6. Вариации фазового шума, вызванные изменением длительности импульса

ние шума на несущей частоте  $F_c$  будет обратно пропорционально  $F$ . Низкое значение  $F$  соответствует высокой спектральной плотности и большему шуму, в то время как увеличение ЧПИ приведёт к снижению шума на несущей.

Как правило, вблизи несущей уровень шума падает очень быстро – со скоростью порядка 20...40 дБ на декаду. Из-за формы огибающей спектра сигнала с импульсной модуляцией, соответствующей функции  $\sin(x)/x$ , наложенный шум на этих отстройках будет ниже уровня шума непрерывного сигнала. Но при больших отстройках, вплоть до  $F/2$ , отклонение будет более заметным, особенно если кривая спектра шума непрерывного сигнала имеет «пьедестал». Так как «пьедестал» на кривой фазового шума означает относительно постоянный уровень энергии во всём диапазоне отстроек частоты, суммарная энергия наложенного шума будет больше, чем для области с постоянно уменьшающимся наклоном.

### Зависимость параметров шума от характеристик модулирующих импульсов

На основе изложенного можно сделать вывод об изменении фазового шума импульсной несущей в зависимости от значения  $F$  и длительности импульса  $\tau$ . Лучше всего это можно оценить по результатам реальных измерений фазового шума при различной длительности импульсов.

На рисунке 6 приведены результаты трёх измерений фазового шума импульсно-модулированной несущей. Все измерения проводились при постоянном значении  $F = 10$  кГц. Первое измерение проводилось при длительности импульса 10 мкс, результаты показаны с помощью синей (средней) кривой. Для второго измерения длительность импульса была увеличена до 50 мкс, результаты показаны с помощью зелёной (нижней) кривой. Фазовый шум уменьшился примерно на 6 дБ. Для этого измерения длительность импульса была увеличена в пять

раз, что привело к кратному уменьшению ширины основного лепестка спектра и количества спектральных линий в основном лепестке. Ожидаемое снижение фазового шума для этого случая составляет  $10\lg_{10}(1/5) = -6,9$  дБ. Полученное значение является упрощённой аппроксимацией наихудшего случая изменения фазового шума.

Последнее измерение, результаты которого соответствуют жёлтой (верхней) кривой на рисунке 6, проводилось при длительности импульса 1 мкс, что в 10 раз меньше, чем во время первого измерения. Видно, что уменьшение длительности импульса привело к увеличению фазового шума несущей.

Исходя из этого, в общем случае фазовый шум импульсной несущей не будет таким же, как фазовый шум непрерывной несущей, в особенности при больших отстройках. С учётом того, что фазовый шум является одним из важнейших и в то же время ограничивающих характеристик для радиосистем, его измерения становятся важной прикладной задачей.

### Метод фазового детектора для измерения фазового шума

Как правило, высокоточные измерения фазового шума выполняются с помощью калиброванного фазового детектора, в котором величина отклонения фазы несущей пропорциональна напряжению на выходе фазового детектора. Сигнал с выхода фазового детектора проходит через фильтр нижних частот и усиливается до подачи на высокопроизводительный аналого-цифровой преобразователь или анализатор Фурье. Реализация метода фазового детектора для измерения фазового шума пояснена на рисунке 7.

В большинстве случаев в качестве фазового детектора используется смеситель, к сигнальному входу которого подключено испытуемое устройство (ИУ), а ко входу для гетеродина подключён опорный генератор. Последний настраивается на ту же частоту, что и ИУ, со сдвигом фазы на  $90^\circ$ . При наличии двух входных сигналов в квадратуре постоянное выходное напряжение смесителя равно нулю, а кратковременные отклонения фазы преобразуются в переменное напряжение. На основе преобразования Фурье рассчитывается спектральная плотность флуктуаций фазы, которую можно преобразовать в фазовый шум.

Описанный метод часто называют методом фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) опорного генератора, т.к. нередко он используется для организации обратной связи с выхода фазового детектора на опорный генератор. Последнее делается для поддержания квадратурного соотношения фаз между ИУ и опорным генератором.

При измерении фазового шума импульсной несущей применение приведённой на рисунке 7 схемы ограничено. При подаче импульсного сигнала на вход фазового детектора и при непрерывном опорном сигнале гетеродина выходное напряжение фазового детектора также становится импульсным и содержит среднее постоянное значение, которое способно вводить малошумящий усилитель в режим насыщения (см. рис. 8). Чтобы этого избежать, как правило, необходимо также использовать опорный сигнал с импульсной модуляцией ИУ.

Добавление импульсной модуляции к опорному источнику (гетеродину) приводит к дополнительным сложностям, т.к. пользователю, скорее всего, придётся с помощью осциллографа контролировать выходной сигнал фазового детектора, чтобы убедиться в отсутствии перегрузки малошумящего усилителя и синхронности импульсной модуляции ИУ, а также опорного сигнала.

Кроме того, пользователь должен подобрать подходящий фильтр нижних частот, чтобы устранить отстройки частоты, превышающие  $F/2$ . В большинстве систем для измерений фазовых шумов используются аналоговые фильтры. Во многих системах требуемый фильтр может быть недоступен. В случаях, когда подходящий фильтр недоступен, пользователь вынужден использовать внешние фазовый детектор и фильтр нижних частот, что в целом

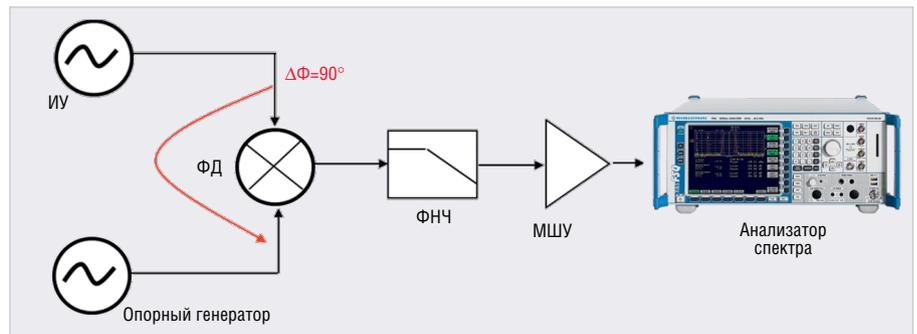


Рис. 7. Реализация метода фазового детектора для измерения фазового шума (ИУ – испытуемое устройство, ФД – фазовый детектор, ФНЧ – фильтр нижних частот, МШУ – малошумящий усилитель)

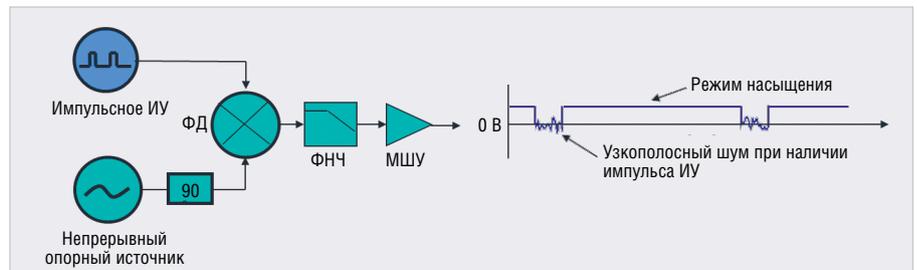


Рис. 8. Формирование сигнала на выходе фазового детектора для импульсного входного сигнала при постоянном опорном сигнале (ИУ – испытуемое устройство, ФД – фазовый детектор, ФНЧ – фильтр нижних частот, МШУ – малошумящий усилитель)

затрудняет процесс измерений, значительно повышая вероятность воздействия внешнего шума на результаты измерения фазового шума. Такие недостатки в значительной степени устранены в анализаторах фазового шума с кросс-корреляционной обработкой.

### Анализаторы фазового шума с кросс-корреляционной обработкой

Одним из ограничивающих факторов метода ФАПЧ опорного генератора является то, что чувствительность такой системы ограничена фазовым шумом опорного генератора. Практическим правилом здесь является выбор генератора, фазовый шум которого, как минимум, на порядок меньше, чем у измеряемого устройства. В большинстве случаев это серьёзно ограничивает чувствительность измерительной установки. Один из способов обойти это ограничение – использовать два одинаковых генератора, предполагая, что итоговый фазовый шум на 3 дБ ниже, чем измеряемый. Часто предположение об идентичности двух источников оказывается неверным, и требуется другое решение. Многие годы более подходящим решением считалось проведение трёх измерений фазового шума с тремя похожими генераторами. Во время измерения каждый генератор являлся поочерёдно опорным и измеряемым источником. По результатам этих

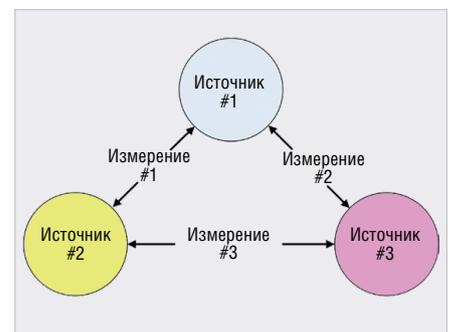
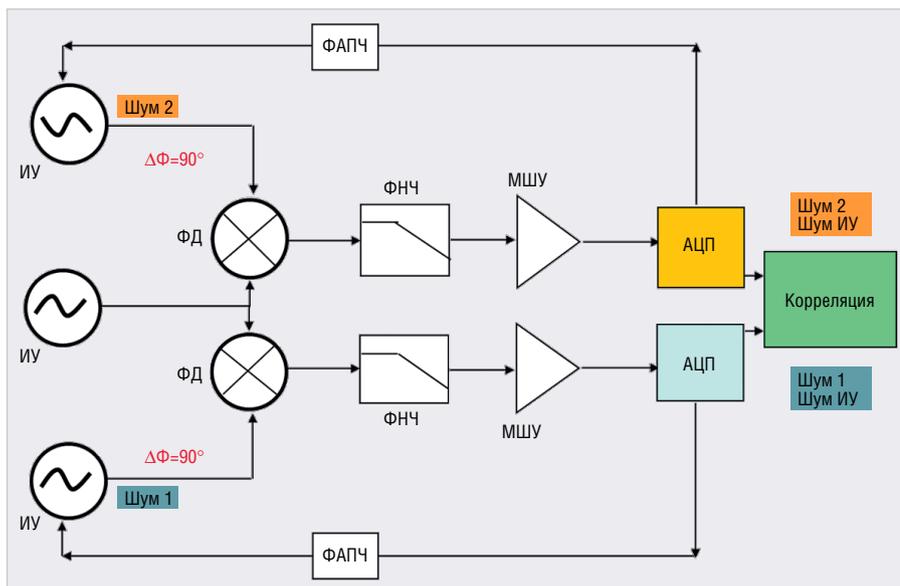


Рис. 9. Метод сравнения трёх источников

измерений фазовый шум каждого генератора можно было определить, решив три уравнения с тремя неизвестными. Такой подход проиллюстрирован на рисунке 9. Сравнение по трём источникам определяет шум каждого источника при условии их сравнимости (разность 3...6 дБ).

В ходе совершенствования техники измерения фазового шума с понижением уровня собственного шума стало очевидно: если разделить сигнал ИУ и подать на две независимые системы с ФАПЧ, то собственный шум измерительной установки не будет коррелирован в обоих каналах за счёт использования индивидуального источника сигнала гетеродина для каждой из систем, а шум от ИУ будет коррелирован в обоих каналах. При таком подходе можно использовать кросс-корреляционную обработку для снижения шума, создаваемого измерительной установкой (прибором). Реали-



**Рис. 10.** Схема измерений фазового шума с кросс-корреляционной обработкой (ФД – фазовый детектор, ИУ – испытуемое устройство, ФНЧ – фильтр нижних частот, МШУ – малошумящий усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты)

зация такого подхода представлена на рисунке 10.

В системе измерения фазового шума с кросс-корреляционной обработкой, как показано на рисунке 10, шум прибора в канале 1 не коррелирован с шумом, формируемым в канале 2. Поэтому при кросс-корреляционной обработке на выходах двух независимых каналов коррелированы будут только сигналы ИУ, а шум измерительной системы сни-

зится на  $51g_{10}(M)$ , где  $M$  – число корреляций. Таким способом можно снизить шум системы на 10 дБ, если провести 100 кросс-корреляций.

Системы на основе фазовых детекторов с кросс-корреляционной обработкой занимали лидирующие позиции на рынке последнее десятилетие, но они все ещё обладали тем же недостатком, что и ранние системы: измерения фазового шума по-прежнему зависели от аналого-

вых компонентов и их возможностей по обработке сигналов. С целью повысить качество самых современных систем измерения фазового шума компания Rohde & Schwarz разработала новый анализатор фазовых шумов FSWP, в котором большая часть обработки сигналов перемещена в цифровую область, в которой характеристики системы обладают большей повторяемостью, а калибровку на уровне системы можно упростить.

Во второй части статьи будут рассмотрены функциональные особенности анализаторов R&S FSWP. Авторы проведут измерения фазового шума сигнала с импульсной модуляцией с учётом десенсибилизации, а также измерения для импульсно-модулированной несущей на анализаторе R&S FSWP. Также будет представлен анализ амплитудной и фазовой стабильностей сигналов с импульсной модуляцией.

### Литература

1. Kay Gbeen. Pulsed phase noise measurements. 2016. URL: [https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/d1\\_downloads/d1\\_application/application\\_notes/1ef94\\_\\_\\_/1EF94\\_1e\\_Pulsed\\_Phase\\_Noise\\_Meas.pdf](https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/d1_downloads/d1_application/application_notes/1ef94___/1EF94_1e_Pulsed_Phase_Noise_Meas.pdf).
2. Ширман Я. Д., Багдасарян С. Т., Маляренко А. С. и др. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Под ред. Ширмана Я. Д. Радиотехника. М. 2007. С. 512.



### НОВОСТИ МИРА

#### Совет безопасности снова отказался отдавать операторам частоты для 5G

Совет безопасности вновь отклонил просьбу сотовых компаний выделить им частоты в диапазоне 3,4–3,8 ГГц для строительства сетей пятого поколения связи (5G).



По словам одного из собеседников «Ведомостей», операторы просили силовиков разрешить им конверсию (расчистку) частот этого диапазона в городах-миллионниках. Необходимость использования частот 3,4–3,8 ГГц они мотивировали нецелесо-

образностью использования другой полосы частот – 4,8–4,99 ГГц (в материалах Минкомсвязи эти частоты называли альтернативой более низкому диапазону).

5G позволяет абонентам использовать мобильный Интернет на очень высокой скорости (до нескольких гигабит в секунду). Это до 100 раз быстрее, чем в нынешних сетях LTE. Кроме того, на базе 5G планируется создавать системы управления беспилотным транспортом, телемедицинские сервисы, системы комплексного управления городским хозяйством.

Диапазон 3,4–3,8 ГГц, для которого предназначено популярное оборудование 5G, в России используется Минобороны и «Роскосмосом», объяснял в 2019 г. вице-премьер Максим Акимов. Но именно на таких частотах сети 5G строятся в большинстве стран Европы – без них практически невозможно запустить полноценные услуги пятого поколения, повторяли неоднократно представители операторов.

Тема выделения частот для 5G обсуждается в Совете безопасности не первый раз. В августе Совбез не поддержал идею выделить операторам связи частоты этого диапазона, а президент Владимир Путин на отрицательный отзыв Совбеза наложил резолюцию «согласен».

В России частотный ресурс 4,8–4,99 ГГц имеет низкую загруженность, однако он пересекается с полосой 4,4–4,99 ГГц, которая активно используется военными стран НАТО для опознавательной системы самолётов «свой – чужой». Это означает, что базовые станции для 5G в этом диапазоне операторы смогут устанавливать только на расстоянии 300 км до сухопутной границы или 450 км до морской границы. К тому же сетевое оборудование для 4,8–4,99 ГГц дорогое, а работающих на этих частотах смартфонов практически нет, комментировал генеральный директор Telescom Daily Денис Кусков.

Ведомости

НОВОСТИ МИРА

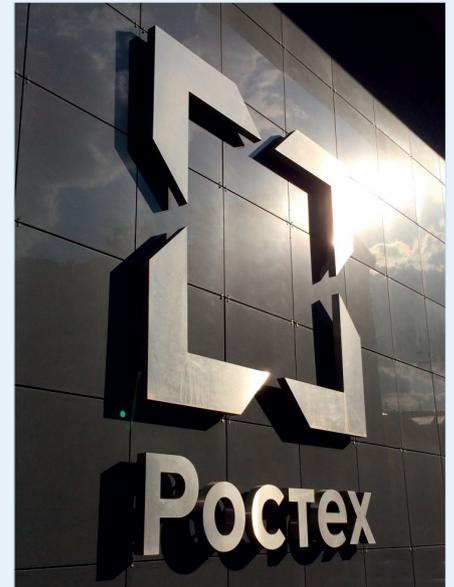
**ЭКСПЕРТЫ ОБСУДИЛИ ВЛИЯНИЕ ПАНДЕМИИ COVID-19 НА РАДИОЭЛЕКТРОННУЮ ОТРАСЛЬ**

Ведущие эксперты радиоэлектронной отрасли России обсудили меры господдержки производителей радиоэлектронной продукции, а также влияние пандемии COVID-19 на предприятия отрасли в ходе Экспертного совета по развитию электронной и радиоэлектронной промышленности при комитете Госдумы по экономической политике, промышленности, инновационному развитию и предпринимательству. Заседание прошло в формате видеоконференции под председательством индустриального директора радиоэлектронного комплекса госкорпорации «Ростех» Сергея Сахненко.

Участники обсудили вопросы кооперации предприятий в рамках выполнения гособоронзаказа на фоне пандемии коронавируса, провели анализ выявленных случаев закупок иностранной продукции при участии в конкурсных процедурах отечественных производителей, а также рассмотрели нормативно-правовые инициативы и эффективность антикризисных мер, направленных на поддержку радиоэлектронной промышленности.

«Сегодня на государственном уровне принимаются конкретные меры поддержки отечественной экономики в сложившихся условиях. Мы как отраслевое сообщество должны держать заданный темп и оказывать экспертную поддержку этих инициатив на местах. Сразу несколько наших предложений были одобрены на заседании бюро Союзмаша и отправлены на рассмотрение в правительство, в частности – о предоставлении предприятиям субсидий, направленных на создание страховых запасов микроэлектронной продукции, применяемой в ОПК и ракетно-космической отрасли», – отметил председатель Экспертного совета, индустриальный директор радиоэлектронного комплекса госкорпорации «Ростех» Сергей Сахненко.

В мероприятии приняли участие представители федеральных органов исполнительной власти, госкорпорации «Ростех», Союза машиностроителей России, холдинга «Росэлектроника», концерна «Автоматика», Национального центра информатизации, АО «Алмаз-Антей», АО «Российские космические системы».



Заседание состоялось при поддержке Координационного совета разработчиков и производителей радиоэлектронной аппаратуры, электронной компонентной базы и продукции машиностроения Союза машиностроителей России.

*Пресс-служба госкорпорации «Ростех»*



**SCHAEFER**

**Источники питания AC/DC**

- Вход: однофазная и трехфазная сеть переменного тока
- Мощность от 100 Вт до 500 кВт
- Выход: от 5 до 800 В постоянного тока
- Диапазон рабочих температур от -40 до +75°C

**Источники питания DC/DC**

- Вход: от 10 до 800 В постоянного тока
- Разнообразные конструктивные исполнения

**DC/AC-инверторы**

- Вход: от 20 до 800 В
- Выходы: однофазное и трехфазное напряжение
- Частота выходного напряжения от 40 до 800 Гц с подстройкой

**AC/AC-преобразователи**

- Преобразование переменного напряжения в однофазное и трехфазное с частотой от 40 до 800 Гц

**Области применения**

- Промышленная автоматизация
- Железнодорожный транспорт
- Испытательное оборудование
- Энергетика
- Нефтегазовая промышленность
- Ответственные применения

**PROSOFT®**

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU



РосТех