

УДК 621.317

НОВЫЕ ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Н.Р. Баженов, А.В. Мыльников, И.М. Малай

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.

bazhenov@vniiftri.ru

lab203@vniiftri.ru

malay@vniiftri.ru

В работе представлена номенклатура измеряемых параметров радиотехнических сигналов, рассмотрена потребность в них промышленности, экономики.

Констатируется повышение требований к параметрам модулированных сигналов. Обсуждаются задачи обеспечения единства измерений параметров цифровой модуляции. Описываются преимущественные методы прослеживаемости измерений параметров цифровых модуляций к существующим государственным поверочным схемам.

Обсуждаются методы подхода к анализу модулированных сигналов. Приводятся методы измерения фазовых шумов.

Делается вывод о необходимости создания исходных эталонов, параметров цифровой модуляции, фазового шума, а также совершенствования первичного эталона единицы электрического импульсного напряжения.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, параметры, радиотехнические сигналы, фазовые шумы, виды модуляции, методы измерения, генерация эталонных сигналов, государственные первичные эталоны, прослеживаемость, стандарты.

NEW TASKS OF METROLOGICAL ASSURANCE OF MEASUREMENTS OF PARAMETERS OF RADIOTECHNICAL SIGNALS

N.R. Bazhenov, A.V. Mylnikov, I.M. Malay

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region

bazhenov@vniiftri.ru

lab203@vniiftri.ru

malay@vniiftri.ru

The paper presents the nomenclature of measured parameters of radiotechnical signals, the need for them in industry and the economy is considered.

It is noted that there is an increase of requirements for the parameters of modulated signals. The problems of ensuring the uniformity of measurements of digital modulation parameters are discussed. Advantageous methods of traceability of measurements of digital modulation parameters to existing state calibration schemes are described.

The methods of approach to the analysis of modulated signals are discussed. Methods for measuring the phase noises are given.

It is concluded that it is necessary to develop basic standards, digital modulation parameters, phase noise, as well as improvement of the primary standard of a unit of electrical pulse voltage.

Key words: metrological assurance, parameters, radiotechnical signals, phase noises, types of modulation, measurement methods, generation of reference signals, state primary standards, traceability, standards.

1. Введение

Развитие метрологического обеспечения измерений параметров радиотехнических сигналов продиктовано потребностями промышленности и экономики. Данный вид измерений востребован в таких областях деятельности, как радиовещание и телевидение, связь, телекоммуникации, авиация (системы посадки, бортовая аппаратура, радиомаяки), производство средств измерений, обеспечение безопасности дорожного движения (измерители скорости) и многих других. Иными словами, там, где осуществляется передача информации. Чтобы понимать актуальные задачи обеспечения единства измерений в данной области, ниже представлен короткий экскурс в историю развития номенклатуры измеряемых параметров радиотехнических сигналов и рассмотрены современные потребности промышленности и экономики.

2. Обзор существующей системы обеспечения единства измерений параметров радиосигналов

Любая передача информации по радиоканалу возможна только при наличии модуляции. Первой появилась импульсная модуляция, когда сообщения передавались азбукой «Морзе». По мере развития технологий для модуляции стали использовать все параметры несущей частоты, т.е. её амплитуду, частоту и фазу. Так появились амплитудная, частотная и фазовая модуляции. В настоящее время для описания амплитудной модуляции используется целый ряд параметров: модулирующая частота, диапазон и погрешность её установки, коэффициент гармонических искажений. Степень амплитудной модуляции (АМ) характеризуется коэффициентом АМ (иногда используют термин «глубина амплитудной модуляции»), диапазон изменений коэффициента АМ, погрешность установки (или измерения) коэффициента АМ, паразитная АМ также характеризуется коэффициентом АМ. Полезную АМ может сопровождать «сопутствующая частотная или фазовая модуляция».

Аналогичные параметры используются для описания частотной и фазовой модуляций, только вместо коэффициента АМ используют в данных случаях «девиацию» частоты или фазы. Также применяют термины: «сопутствующая АМ», «паразитная девиация частоты».

Для описания импульсной модуляции применяют терминологию аналогичную импульсной технике, а именно частоту повторения радиоимпульсов, длительность, скважность, «спад вершины» или её неравномерность,

длительность фронта и среза, задержку импульса. Соответственно используют для нормировки диапазоны изменений и погрешности установки этих параметров. Для описания свойств импульсного модулятора применяют отношение мощностей сигналов в открытом и запертом состоянии импульсного модулятора, быстродействие нормируют длительностью фронта и среза. Спецификой при описании импульсной модуляции является амплитудный и временной (фазовый) «джиттер», называемый также «фазовое дрожание».

Импульсная модуляция подразделяется на «широотно-импульсную», «кодово-импульсную» и «линейно-частотную» модуляцию. Для описания этих видов модуляции используется диапазон изменений и погрешность установки, кроме того, нормируют линейность изменения частоты.

Существует большой парк рабочих средств измерений (РСИ), насчитывающий сотни тысяч приборов, к которым осуществляется передача единиц посредством более тысячи рабочих эталонов (РЭ), подчинённых государственным первичным эталонам (табл. 1) и вторичным эталонам (ВЭТ). Значительная часть рабочих средств измерений АМ и ЧМ приходится на генераторы сигналов.

Таблица 1

Передача единиц измерений параметров радиосигналов от государственных первичных эталонов

| Наименование и обозначение эталона | Количество подчинённых СИ | | | Количество проверок рабочих эталонов на ГПЭ в год | |
|---|---------------------------|-----------|--------|---|-------|
| | ВЭТ | РЭ | РСИ | для центров стандартизации и метрологии | всего |
| ГПЭ единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004 | 1 | более 100 | 100000 | 39 | 105 |
| ГПЭ единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний ГЭТ 180-2010 | 1 | более 100 | 150000 | 42 | 115 |
| ГПЭ единицы импульсного электрического напряжения ГЭТ 182-2010 | 1 | 500 | 500000 | 33 | 157 |
| ГЭТ единицы коэффициента гармоник 188-2010 | 32 | 400 | 70000 | 47 | 115 |

С развитием цифровых средств измерений наблюдается тенденция оценки параметров аналоговых сигналов путём их цифровой обработки. На этом принципе построены современные генераторы и анализаторы сигналов, в которых обеспечивается возможность измерения широкой номенклатуры параметров: параметров модулированных сигналов, параметров цифровой модуляции, уровня амплитудных и фазовых шумов и др. Уже не является новой практика генерации эталонных сигналов с амплитудной или частотной модуляцией [1], с заданным коэффициентом гармоник методом прямого цифрового синтеза или их измерений с использования квадратурного демодулятора [2].

Такая тенденция имеет свои преимущества. Точность современных векторных генераторов и анализаторов сигналов позволяет создавать на их основе рабочие эталоны, а зачастую обеспечить сопоставимые с государственными первичными эталонами метрологические характеристики. Например, многофункциональные калибраторы сигналов (Fluke 9640A, 96040A, 96270A) требуют проведения их поверки (калибровки) сразу на нескольких эталонах, а высокая точность, необходимая для поверки, требует в ряде случаев проведения измерений непосредственно на первичных эталонах.

3. Задачи обеспечения единства измерений параметров цифровой модуляции

Ситуация изменилась за последнее годы с развитием цифровых систем связи и цифрового телевидения, в которых используется векторная или «цифровая» модуляция. Основным отличием этой модуляции является передача цифровых данных путём одновременного дискретного изменения двух параметров сигнала. Это увеличивает число возможных состояний передаваемого сигнала и таким образом позволяет увеличить скорость передачи данных при той же выделенной полосе пропускания канала. В случае применения векторной модуляции в зависимости от передаваемого цифрового кода одновременно изменяются амплитуда и фаза сигнала.

Интерес к цифровым модуляциям обусловлен также развитием цифровой экономики. Правительственная Программа её развития до 2030 года включает в себя значительные изменения в телекоммуникациях, как в инфраструктуре для передачи больших объёмов информации. Это связано с физическими ограничениями существующих технологий связи, не позволяющими обеспечить новые потребности экономики. Всё это привело к необходимости создания систем связи нового поколения 5G. Один из целевых показателей Программы — это обеспечение к 2024 году во всех крупных городах (1 млн. человек и более) устойчивого покрытия 5G и выше.

Без контроля параметров модулированных сигналов невозможно в полной мере обеспечить целостность каналов связи. Несмотря на то, что стан-

дарт связи 5G пока находится в стадии разработки и конечные параметры сети пока не сформированы, прослеживаются общие тенденции, связанные с использованием более сложных видов модуляции, расширением полосы пропускания каналов связи и переходом на более высокие частоты (табл. 2). Данные изменения ведут к существенному повышению требований к параметрам модулированных радиосигналов. В настоящее время квадратурная амплитудная модуляция, используемая в сетях 4G, на практике ограничена количеством созвездий 256, однако в рамках создания нового поколения мобильной связи 5G ведутся работы по расширению границ формата до 1024QAM.

Таблица 2

Сравнение поколений мобильной связи

| Поколение | 1G | 2G | 2,5G | 3G | 3,5G | 4G | 5G |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------|----------------|---|---------------------------|--|---------------------------|
| Начало разработок | 1970 | 1980 | 1985 | 1990 | <2000 | 2000 | 2016 |
| Реализация | 1984 | 1991 | 1999 | 2002 | 2006–2007 | 2008–2010 | 2020 |
| Стандарты | AMPS, TACS, NMT | CDMA, GSM, PDC | GPRS, EDGE | IMT-2000 (W-CDMA, CDMA2000, UMTS, DECT) | HSDPA, HSUPA, HSPA, HSPA+ | LTE, LTE-Advanced, WiMax Release 2 (IEEE 802.16m), Wireless-MAN-Advanced | IMT-2020 |
| Разделение каналов связи | FDMA | TDMA, CDMA | CDMA | CDMA, W-CDMA | CDMA, W-CDMA | OFDM (MIMO) | OFDM (MIMO) |
| Виды модуляции | FM, PM, фазовая манипуляция | GMSK, QPSK | 8PSK | QPSK, 16QAM | QPSK, 16QAM, 64QAM | QPSK, BPSK, 16QAM-256QAM | BPSK, QPSK, 16QAM-1024QAM |
| Диапазон частот, МГц | 453–467,5 824–960 | 824-1900 | 824-1900 | CDMA 1250–2100 UMTS 1885–2200 | 1885–2200 | LTE 1400–2000 WiMAX 1500–11000 | 450–6000 24250–52600 |
| Полоса каналов связи | От 12,5 до 30 кГц | 25, 30, 200, 1250 кГц | 200 кГц | 5 МГц | 5, 10 МГц | 20 МГц, 100 МГц | 5, 50, 100, 400 МГц |
| Скорость передачи | 1,9 кбит/с | 9,6–14,4 кбит/с | 115–384 кбит/с | до 3,6 Мбит/с | до 42 Мбит/с | 100 Мбит/с – 1 Гбит/с | До 20 Гбит/с |
| Требования к качеству сигнала | Девиация частоты, Гц | BER | BER | BER | BER, EVM (позже) | EVM | EVM |

До недавнего времени основным параметром, характеризующим качество сигнала, являлся BER (*Bit Error Rate*) — коэффициент битовых ошибок. Им

нормируется частота появления ошибочно восстановленных битов в демодулированном потоке данных.

Измерение этого параметра даёт фактическую оценку целостности канала передачи данных, но применение BER имеет ряд практических недостатков, в основном связанных с ограниченными диагностическими возможностями. Если измеренное значение выходит за допустимые пределы, оно не даёт информации о причине и месте возникновения неполадки.

В связи с этим постепенно требования по BER в стандартах связи были дополнены другим параметром, характеризующим качество цифровых сигналов уже на физическом уровне, таким как «*Error Vector Magnitude*» (EVM) — величина вектора ошибки (рис. 1).

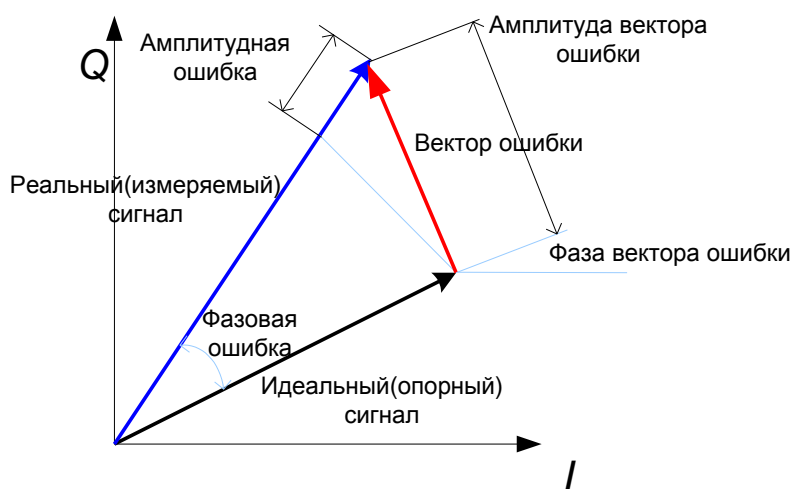


Рис. 1. Диаграмма одной из точек сигнального созвездия

По существу, параметры воспроизводимых ранее сигналов так же, как и EVM, характеризуют отклонение от номинального значения. Разница заключается в том, что отклонения параметров модуляции от номинальных значений редко приводят к искажению передаваемой информации. В случае же векторной модуляции превышение EVM некоторого значения приводит к неверному результату в расшифровке передаваемой информации.

Развитие телекоммуникаций ведёт к увеличению парка средств измерений параметров цифровой модуляции, необходимых для обеспечения целостности и устойчивости функционирования сети связи нового поколения, которое напрямую диктуется законом «Об обеспечении единства измерений». К таким средствам измерений относятся векторные генераторы и векторные анализаторы сигналов. Среди производителей таких средств измерений сейчас лидируют зарубежные фирмы Rohde&Schwarz, Keysight

Technologies, Anritsu. Существуют и отечественные разработки, например, линейка генераторов Г4М производства АО НПФ «Микран». При этом с нормировкой EVM у данных средств измерений ситуация не вполне определённая.

В документации иностранных производителей для векторных генераторов сигналов обычно указываются либо типичные или «измеренные» значения собственного EVM, которые, как правило, не превышают 1%. Нормировка проводится для конкретных типов модуляции с определёнными параметрами, берущими своё начало в стандартах связи. Анализаторы сигналов, в отличие от генераторов, функционально позволяют измерять значения EVM, в этом случае речь уже идёт о диапазоне и точности измерений данного параметра. В описаниях на средства измерений отечественных производителей требования по EVM, как правило, отсутствуют.

Из нескольких десятков внесённых в государственный реестр типов средств измерений параметр EVM нормируется лишь у отдельных типов векторных генераторов и анализаторов сигналов. При этом в качестве средств поверки указаны средства измерений, ранее испытанные с нормируемым EVM или просто имеющие функциональные возможности измерения EVM. В целом метрологическую базу для данного вида измерений можно назвать недостаточной.

Данная ситуация обусловлена существовавшим ранее многократным запасом между точностью средств измерений цифровой модуляции и требованиями к EVM в стандартах связи (до нескольких десятков раз). Например, требования по EVM согласно стандарту связи LTE [3] в зависимости от типа модуляции составляют от 3,5 до 17,5 % (табл. 3).

Таблица 3
Требования к EVM передатчика сигналов в стандарте LTE

| Тип модуляции | Требования по EVM, %, не более |
|---------------|--------------------------------|
| QPSK | 17,5 |
| 16QAM | 12,5 |
| 64QAM | 8 |
| 256QAM | 3,5 |

При переходе к более сложной модуляции 1024QAM, расширении полосы канала связи и повышении несущих частот до миллиметровых длин волн требования по EVM в стандартах связи приблизятся к собственным характеристикам средств измерений. В этом случае возникает необходимость в строгой нормировке и обеспечении единства измерений данного параметра, чем и обусловлена одна из актуальных задач в области метрологии параметров радиосигналов.

Одним из методов измерений, который может быть положен в основу создания такого эталона, является метод эквивалентных сигналов [4]. Воспроизведение сигналов с нормированной величиной EVM осуществляется при помощи «эквивалентных сигналов» с определёнными значениями ошибок модуляции, путём использования комбинации двух немодулированных синусоидальных сигналов или сигналов с аналоговой модуляцией с заданными в соответствии с расчётом параметрами. При определённых соотношениях параметров эквивалентного сигнала он воспринимается средствами измерений параметров цифровой модуляции, как сигнал с векторной модуляцией.

Несомненными преимуществами данного метода являются возможность использования стандартных средств измерений и обеспечение метрологической прослеживаемости к существующим государственным поверочным схемам (табл. 4).

Таблица 4

Обеспечение метрологической прослеживаемости измерений параметров цифровых модуляций к государственным первичным эталонам единиц

| Измеряемый параметр | Эквивалентный MPSK сигнал | Прослеживаемость измерений к эталонам |
|----------------------------|---|---|
| EVM | Комбинация двух синусоидальных сигналов | Отношение мощностей двух сигналов (ГЭТ 26-2010, ГПЭ единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах в диапазоне частот (0,03...37,5) ГГц, ГЭТ 193-2011 ГПЭ единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 0 до 178 ГГц) |
| Амплитудная ошибка | Сигнал с амплитудной модуляцией | Государственный первичный эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний ГЭТ 180-2010 |
| Фазовая ошибка | Сигнал с фазовой модуляцией | ГЭТ 166-2004 Государственный специальный эталон единицы девиации частоты |

Принцип работы измерителей параметров векторной модуляции основан на демодуляции, формировании на основе демодулированной информации опорного сигнала и сравнении его с входным сигналом для расчёта EVM.

Как известно, спектр идеального модулированного сигнала бесконечен, поэтому для ограничения полосы частот, занимаемой сигналом, применяются фильтры. Форма модулированного сигнала во временной области, как и его спектр, связана с параметрами фильтров. Для корректного формирования опорного сигнала должны применяться параметры фильтрации, соответствующие параметрам входного сигнала. Данные параметры, как правило, стандартизованы, а их несоответствие приводит к увеличению измеренного значения EVM из-за отличия переходных процессов опорного и измеряемого сигнала.

Другой подход связан с анализом модулированных сигналов во временной области с обеспечением прослеживаемости к эталону единицы импульсного электрического напряжения. Данный метод позволяет контролировать переходные процессы модулированного сигнала. В зарубежных публикациях NIST (США), PTB (Германия), NPL (Великобритания) встречается такой термин, как «*full waveform metrology*» — дословно можно перевести, как «метрология полного описания формы сигнала» [5]. Целью такого подхода является обеспечение измерений любой точки временной области сигнала с оценкой точности. Пример прослеживаемости измерений параметров цифровых модуляций в NIST представлен на рис. 2.



Рис. 2. Прослеживаемость измерений параметров цифровых модуляций в NIST

В основе такой системы лежит эталон импульсного электрического напряжения, который в свою очередь прослеживается к основным единицам СИ. Одним из нормируемых параметров для реализации такого подхода является время нарастания переходной характеристики ультракороткого импульса порядка 1 пс, требования к которому определяются характеристиками выпускаемых средств измерений. Например, полоса пропускания осциллографов уже достигла 110 ГГц, а полоса анализа современных анализаторов сигналов — 1 ГГц.

4. Перспективы совершенствования эталона единицы импульсного электрического напряжения

При совершенствовании в 2010 году эталона единицы импульсного электрического напряжения ГЭТ 182, хранящегося во ВНИИФТРИ, был использован расчётно-экспериментальный метод для определения метрологических характеристик генератора перепада и эталонного измерителя [6]. Применение такого подхода обусловлено отсутствием на тот момент устройств формирования (измерения) эталонного импульсного сигнала с необходимым быстродействием, основанных на фундаментальных физических явлениях или константах, как это осуществляется, например, для эталонов напряжения постоянного тока. Подобные решения применялись в прошлом и в других национальных метрологических институтах.

Современные исследования связаны с применением электрооптической системы для воспроизведения единицы импульсного напряжения (рис. 3).

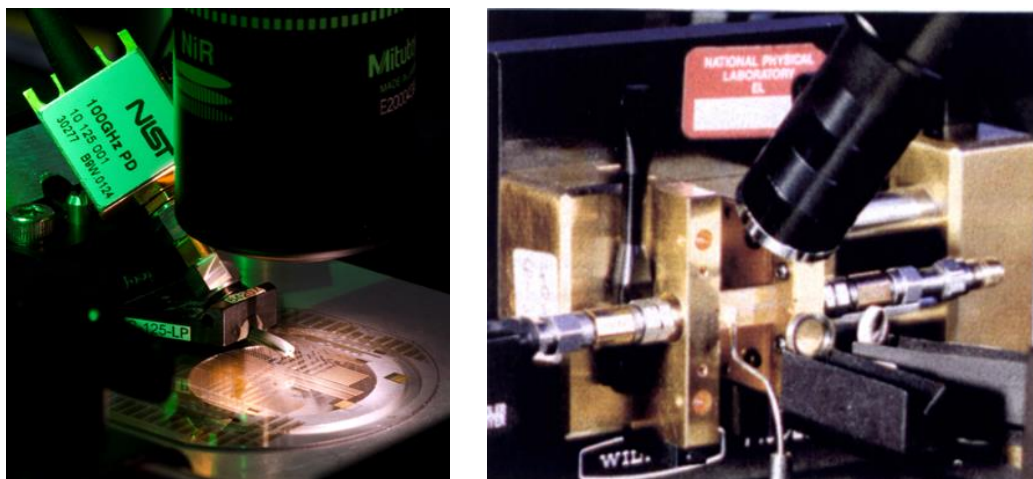


Рис. 3. Внешний вид электрооптических установок NIST и РТВ

Принцип действия установки основан на двух эффектах: эффекте фотопроводимости и электрооптическом эффекте Погкельса. Первый эффект

Альманах современной метрологии, 2019, № 2 (18)

применяется для генерации ультракоротких импульсов путём кратковременного создания зоны проводимости лазером накачки на специальной микрополосковой структуре, нанесённой на подложку из низкотемпературного арсенида галлия (LT-GaAs). Выбор материала подложки связан с необходимостью минимизации времени жизни неравновесных носителей заряда. Второй эффект применяется для измерения формы импульса зондирующим лазером при помощи оптической линии задержки и электрооптического зонда, который помещается в электрическое поле вблизи микрополосковой линии.

Данная система генерирует электрические импульсы с малой длительностью фронта (менее 1 пс) при помощи фемтосекундного лазера. Самый короткий электрический импульс, параметры которого были измерены, имел длительность порядка 650 фс (с фотооптическим LT-GaAs ключом на полосковой линии). Форма создаваемых импульсов измеряется стробированием при помощи короткого импульсного лазера с длительностью порядка 150 фс, полоса пропускания такой системы достигает 1 ТГц. В электрооптической системе обеспечивается прослеживаемость через линию оптической задержки к единицам длины, времени и частоты, а через измерение мощности СВЧ и измерение волнового сопротивления линии передачи к единице электрического напряжения.

Данный метод воспроизведения импульсного напряжения применяется для калибровки быстродействующих осциллографов с полосой до 110 ГГц и в конечном итоге позволяет выстроить систему обеспечения единства измерений параметров цифровой модуляции и современных цифровых средств измерений в целом [7]. В перспективе планируется применение данного метода на эталоне ГЭТ 182, и в настоящее время ВНИИФТРИ ведётся поиск путей для его реализации.

5. Задачи метрологического обеспечения измерений фазовых шумов

С развитием цифровых систем связи также растут требования к качеству несущей частоты по фазовым шумам, поскольку от этого зависит скорость и точность передачи информации. Высокие требования к фазовым шумам предъявляются и в системах радиолокации, где уровень фазового шума непосредственно влияет на такие ключевые параметры, как дальность и разрешение.

Уровень фазовых шумов — это один из основных параметров оценки кратковременной стабильности частоты любого источника сигнала. Согласно определению института инженеров электротехники и электроники (IEEE) фазовый шум равен половине спектральной плотности мощности нестабильности фазы и выражается формулой $L(f) = S_{\phi}(f) / 2$, где $L(f)$ — спектральная плотность мощности (СПМ) фазового шума в одиночной боковой полосе; $S_{\phi}(f)$ — СПМШ в заданной полосе частот.

Фазовый шум имеет размерность децибелы относительно несущей на герц полосы (дБн/Гц) и по определению представляет собой флуктуацию фазы, возникающую по причине теплового шума, дробового шума и фликкер-шума в полупроводниковых элементах. Реальный сигнал можно описать формулой

$$S(t) = (S_0 + \Delta(t)) \cdot \sin(2\pi f_0 t + \Delta\phi(t)),$$

где $\Delta(t)$ — флуктуация амплитуды; $\Delta\phi(t)$ — флуктуация фазы; S_0 — номинальная амплитуда сигнала; f_0 — номинальная частота сигнала, поэтому более корректно разделять фазовый и амплитудный шум.

Для устойчивой работы и обеспечения необходимой скорости и точности передачи информации необходимо минимизировать как абсолютный уровень фазовых шумов в источниках сигналов, так и аддитивный фазовый шум в усилителях мощности радиопередающих и радиоприёмных устройств, например, базовых станций мобильной связи. Требования по уровню фазовых шумов нормируются у большинства серийно выпускаемых современных генераторов сигналов.

Самыми распространёнными в настоящее время являются три метода измерения фазовых шумов: метод кросс-корреляции, метод фазового детектора и метод прямого измерения на анализаторе спектра. Метод прямого измерения ограничен шумами анализатора спектра и не позволяет оценить фазовый шум отдельно от амплитудного. Метод фазового детектора не позволяет оценить фазовый шум на широкой полосе, т.е. на больших отстройках и не даёт полной картины спектра. Метод кросс-корреляции позволяет повысить чувствительность измерения фазовых шумов, но необходимы два независимых высокостабильных опорных генератора. На данный момент метод кросс-корреляции является наилучшим с точки зрения чувствительности к фазовому шуму.

Несмотря на то, что данный вид измерений трудно назвать новым, в федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений не зарегистрировано ни одного эталона единицы уровня фазового шума.

Существующая система единства измерений фазовых шумов базируется на Государственных первичных эталонах единиц коэффициента амплитудной модуляции и девиации частоты, применяемые при этом методы передачи не обеспечивают наиболее критичный диапазон измерений малых значений фазовых шумов. Для его контроля необходимы средства измерений с пониженным уровнем фазовых шумов.

Поскольку метрологические характеристики средств измерений задаются диапазоном измерений и точностью измерений, то одним из основных параметров, характеризующих измерители фазового шума, является порог чувствительности. Он обеспечивается уровнем фазовых шумов внутреннего (внешнего) опорного источника сигнала. Метод кросс-корреляции позволяет повысить порог чувствительности за счёт увеличения числа корреляций, но

возникает сложность оценки собственных фазовых шумов и зачастую оценка данного параметра остаётся на совести изготовителя. Поэтому одна из задач при создании эталона состоит в разработке методов оценки порога чувствительности измерителей фазовых шумов.

Другая задача связана с оценкой точности измерений уровня фазовых шумов с обеспечением прослеживаемости к первичным эталонам величин. В ведущих зарубежных институтах метрологии, таких как NIST (США), METAS (Швейцария), LNE (Франция), данная задача решается с использованием эталонного источника фазового шума APNS (*additive phase noise standard* — эталон аддитивного фазового шума).

Данное устройство включает в себя генератор синусоидального сигнала и генератора шума, выходы которых складываются при помощи сумматора (рис. 4). Такая схема обеспечивает большой динамический диапазон до 140 дБ и более. Раздельное управление генераторами позволяет измерять суммарную мощность и СПМШ генератора шума.

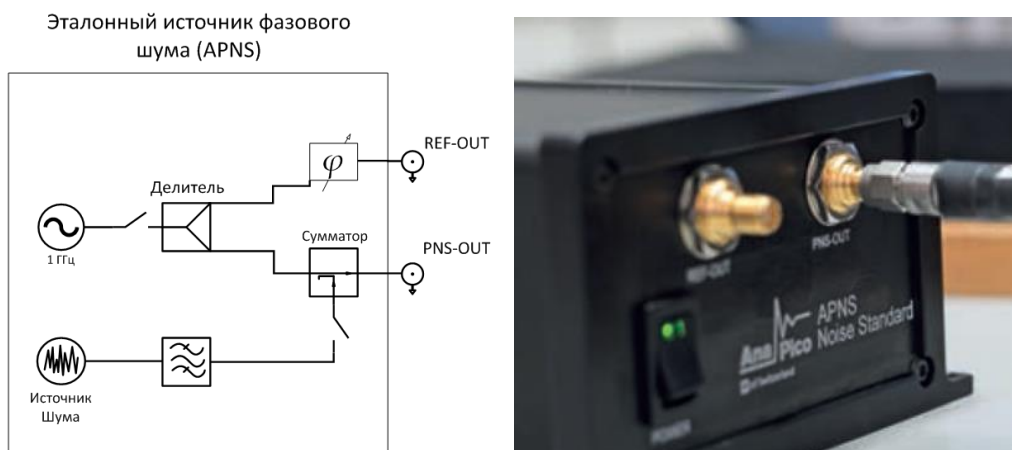


Рис. 4. Структурная схема и внешний вид эталонного источника фазового шума

Для калибровки APNS применяются два независимых метода [8]. Первый метод — метод отношения мощностей, основан на относительных измерениях мощности шумов к суммарной мощности сигнала с помощью анализатора спектра и прослеживается к эталону единицы мощности электромагнитных колебаний. При этом за счёт учёта комплексных коэффициентов отражения входов и выходов средств измерений исключается погрешность рассогласования.

Второй так называемый абсолютный метод, основанный на измерении мощности несущей и сравнении спектральной плотности мощности шума APNS со спектральной плотностью мощности шума эталонного генератора шума, прослеживается к эталонам единиц мощности электромагнитных ко-

лебаний и единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения. В настоящее время ведутся исследования по применению обоих методов для разработки исходного эталона единицы уровня фазовых шумов.

6. Заключение

Таким образом, новые задачи обусловлены необходимостью расширения существующей системы обеспечения единства измерений параметров радиосигналов, т.к. она не может в полной мере обеспечить все потребности промышленности и экономики. Основные направления её развития обусловлены необходимостью создания исходных эталонов параметров цифровой модуляции, фазового шума, а также совершенствования первичных эталонов, в том числе ГПЭ единицы электрического импульсного напряжения на новых принципах генерации и измерения параметров ультракороткого импульса с использованием фемтосекундных лазеров.

Литература

1. Мыльников А.В., Пивак А.В. Калибратор амплитудно- и частотно-модулированных сигналов на базе векторного генератора // Измерительная техника. М., 2014. № 4. С. 37–40.
2. Humphreys D.A., Harper M.R., Roberts P. Traceable amplitude modulation measurement using in-phase and quadrature referencing / International Waveform Diversity & Design Conference. Italy, Pisa, 2007, June 4–8. P. 145–149.
3. Technical specification LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 13.3.0 Release 13, 2016-04).
4. Zhang Rui, Zhou Feng, Gu Long-qing, Wang Nan Metrology of vector modulation error: problems and solution / Conference on Precision Electromagnetic Measurements. 2010, June 13–18.
5. Hale P.D., Williams D.F., Dienstfrey A., Wang J., Jargon J., Humphreys D.A., Harper M., Fuser H., Bieler M. Traceability of high-speed electrical waveforms at NIST, NPL and PTB / Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2012). USA, Washington DC, 2012, 1–6 July. P. 522–523.
6. Маневич В.З., Селин Л.Н. Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса $4 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-5}$ с // Измерительная техника. М., 2011. № 12. С. 6–11.
7. Humphreys D.A., Harper M.R., McInnes L.K.J., Miall J. Strategy for traceability of complex modulated signals using RF waveform metrology / in Proc. of XXIX URSI General Assembly. Chicago, USA, Aug. 2008, P. A03.6.
8. Bernier L.-G., Stalder D., Morel J., Kucera J., Dahinden S. Traceable calibration of a psase noise standard. PTTI-2017.