

УДК 621.376.2

ЦИФРОВОЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ АМ И ЧМ СИГНАЛОВ**А.В. МЫЛЬНИКОВ**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
lab203@vniiftri.ru

Сигналы, сформированные методом прямого цифрового синтеза, отличаются от сигналов, сформированных аналоговыми устройствами. Рассмотрены особенности АМ и ЧМ колебаний, сформированных цифроаналоговым преобразователем, которые влияют на измеряемые параметры сигнала. Приведены данные по цифровому анализу АМ и ЧМ сигналов на примерах цифровых средств измерений.

Signals generated by the method of direct digital synthesis are different from signals generated by the analog devices. The features of the AM and FM oscillations generated by a digital-to-analog converter, which affect the measured signal parameters, are considered. The data on the digital analysis of AM and FM signals on examples of digital measuring instruments are given.

Ключевые слова: цифровой синтез, сигналы, цифровые средства измерений, девиация частоты, государственный первичный эталон, государственный специальный эталон.

Key words: digital synthesis, signals, digital measuring instruments, frequency deviation, state primary standard, state special standard.

Цифровая революция кардинально преобразила современные технические средства связи, радио, телевидения, звукозаписи, систем охраны и безопасности и другие. Наиболее ярко заметен технический прогресс на примере телефона. Современный телефон обрёл такие функции, о которых потребитель 20–30 лет назад не мог и подумать: это одновременно телефон, часы, видеокамера, диктофон, компьютер, навигатор и т.д. Цифровые технологии постепенно вытесняют технологии аналоговые, традиционно господствующие в радиотехнике, телевидении, измерительной технике.

Современные средства измерений всё шире используют прямой цифровой синтез (*Direct digital synthesis* — DDS) для формирования сигналов и цифровой анализ для измерения параметров различных сигналов. В генераторах с цифровым синтезом сигнал сначала задаётся в цифровом коде, а затем преобразуется быстродействующим цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) в выходной сигнал с заданными параметрами (амплитуда, несущая и модулирующая частота, коэффициент амплитудной модуляции, девиация частоты и др.). Из-за ограниченности частотного диапазона ЦАП применяют умножители и преобразователи частоты, увеличивая таким образом рабочий диапазон частот генератора. Цифровой синтез, например, использован в генераторах Г4-219, SMB100A, С, 81150A, 81160A AWG 70000.

Цифровой анализ сигнала, напротив, предполагает сначала преобразование несущей частоты сигнала в промежуточную частоту (ПЧ), оцифровку быстродействующим АЦП и анализ цифрового массива данных. По этому

принципу строится большинство современных анализаторов сигналов (N9020A, N9030A, SPN9003A), анализаторов спектра (E4440A, FSV, FSW), измерительных приёмников (FSMR, ESPI). На базе цифрового анализа построены новые государственные первичные эталоны [1, 2], а также ряд рабочих эталонов.

Государственный первичный специальный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004 [3] и Государственный первичный эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний ГЭТ 180-2010 [4] используют цифровую обработку сигнала, но формирование сигнала калибратором девиации частоты и калибратором коэффициента АМ производится аналоговыми методами. Задачей исследований по усовершенствованию указанных эталонов и является рассмотрение возможностей цифрового синтеза для формирования необходимых сигналов с заданным значением девиации частоты, а также коэффициента АМ.

Для решения изложенной задачи был выбран ряд генераторов, построенных по принципу «DDS», и сравнивались их характеристики с характеристиками имеющихся аналоговых калибраторов. В результате многолетних исследований было установлено, что в ряде случаев цифровое формирование АМ и ЧМ сигнала позволяет получить преимущества и применить выбранные генераторы сигналов для эталонных средств измерений. В частности, генератор сигналов фирмы «Rohde & Schwarz» SMB100A, который с высокой точностью воспроизводит АМ сигналы, у которых несущие частоты менее 23 МГц.

Это калибратор АМ и ЧМ сигналов, построенный на базе генератора SMBV100A, его внешний вид приведён на рисунке 1, а метрологические характеристики — в таблице 1.



Рис. 1. Внешний вид калибратора SMBV-AM-FM

Таблица 1

Модулирующая частота, Гц	Режим АМ	Режим АМ
	Пределы допускаемой абсолютной погрешности воспроизведения:	
	коэффициента АМ – M	девиации частоты – ΔF
от 0,02 до 1 кГц	$\pm (0,004M + 0,2 \%)$	$\pm (0,3 \% \Delta F + 2 \text{ Гц})$
от 1 до 20 кГц	$\pm (0,004M + 0,2 \%)$	$\pm (0,3 \% \Delta F + 20 \text{ Гц})$
от 20 до 200 кГц	$\pm (0,005M + 0,2 \%)$	$\pm (0,4 \% \Delta F + 600 \text{ Гц})$

Генератор сигналов SMB100A использовался в качестве транспортируемого эталона-переносчика для международных сличений между Россией, Республикой Беларусь и Украиной. Генератор сигналов имеет встроенный генератор модулирующего напряжения, поэтому позволяет воспроизводить значения коэффициентов амплитудной модуляции на различных модулирующих частотах. Применённый в эталоне-переносчике принцип действия позволил добиться высокой стабильности воспроизведения сигналов и положительных результатов международных сличений. При большом объёме выполненных согласно протоколу сличений измерений размер единицы коэффициента АМ согласуется для каждого из 186 значений, воспроизводимых национальными эталонами.

Отличие результатов сличений от среднего значения не превышает расширенной неопределённости в каждом из измеренных значений, что подтвердило размер воспроизводимых единиц коэффициента АМ, правильность оценки неопределённости измерений и стабильность генератора SMB100A в качестве эталона-переносчика [5].

Другим, отобранным из двух десятков типов генераторов, является калибратор SMBV-AM-FM, созданный на базе генератора сигналов фирмы «Rohde & Schwarz» SMBV100A путём разработки дополнительного программного обеспечения [6]. Калибратор SMBV-AM-FM может быть поверен в качестве эталона 1-го разряда по ГОСТ Р 8.607-2004 ГСИ Государственная поверочная схема для средств измерений девиации частоты и в качестве эталона 1-го разряда по ГОСТ Р 8.717-2010 ГСИ Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний. Он совмещает в себе функции как калибратора коэффициента АМ, так и калибратора девиации частоты, заменяя сразу 6 блоков аппаратуры установок К2-34 и К2-38. Во-вторых, он не требует операции калибровки, исключая таким образом не только трудоёмкую операцию калибровки, но и требуемые для этого осциллограф (для К2-34) и частотомер (для К2-38). За счёт этого сокращается в 1,5–2 раза время поверки

измерителей модуляции. Несколько калибраторов SMBV-AM-FM успешно применяются в территориальных поверочных органах.

Генераторы типа SMB100A имеют частоту дискретизации 200 МГц и на несущих частотах до 23 МГц с высокой точностью воспроизводят не только коэффициент АМ, но и девиацию частоты. Однако принятой несущей частотой для передачи размера единицы девиации частоты является точка 50,0 МГц. На ней осуществляется поверка эталонных средств измерений, она входит в диапазон частот практически всех измерителей девиации частоты. Поэтому для цифрового формирования ЧМ сигналов требуется ЦАП с более высокой частотой дискретизации. В настоящее время частота дискретизации может составлять десятки гигагерц, однако на высоких частотах разрядность ЦАП уменьшается. В процессе исследований был выбран генератор с 14-разрядным ЦАП, имеющий частоту дискретизации 2,5 ГГц. Этого оказалось достаточно, чтобы на выходе генератора 81160A фирмы «Keysight technologies» обеспечить параметры ЧМ сигнала, превосходящие параметры эталонного аналогового калибратора из состава первичного эталона.

Было установлено, что цифровое формирование ЧМ сигнала позволяет воспроизводить девиацию частоты в более широком диапазоне, чем формирование обычным аналоговым калибратором. Диапазон аналогового генератора (калибратора) связан с линейностью его характеристики: чем больше воспроизводимое значение девиации частоты, тем более нелинейна его характеристика. А именно погрешность из-за нелинейности является доминирующей составляющей неисключённой систематической погрешности. Проведённые исследования показали, что в диапазоне значений девиации до 1 МГц нелинейные искажения ЧМ сигнала на выходе генератора 81160А на порядок меньше, чем у эталонного калибратора.

Диапазон воспроизводимых значений девиации частоты, согласно данным изготовителя, может составлять **от 1 мкГц до 500 МГц** в зависимости от выбранной формы сигнала. Очевидно, что для несущей частоты 50 МГц реализовать максимальное значение девиации частоты можно не более 50 МГц. Что касается девиации 1 мкГц, то из-за наличия паразитной девиации частоты или частотных шумов это невозможно. В [7] отмечалось, что шумовые характеристики приборов на основе быстродействующих ЦАП и АЦП ещё уступают аналоговым средствам измерения.

Дальнейшие исследования позволили выделить ряд особенностей, присущих генераторам прямого цифрового синтеза. Во-первых, это ограничения в реализации потенциальных характеристик ЦАП, связанные с классическими физическими ограничениями — быстродействием и разрядностью ЦАП.

Совершенно очевидно, что каким бы идеальным ни был сформированный сигнал, в нем будет присутствовать частота дискретизации ЦАП — f_d , а в общем случае её гармоники и субгармоники. Экспериментальная проверка

спектра выходного сигнала генератора 81160А подтвердила наличие составляющих спектра f_d , $2 \cdot f_d$, $3 \cdot f_d$, ... Однако обнаружились и другие паразитные составляющие спектра, например, на рисунке 2 видно присутствие в спектре генератора сигнала частотой 574 МГц.

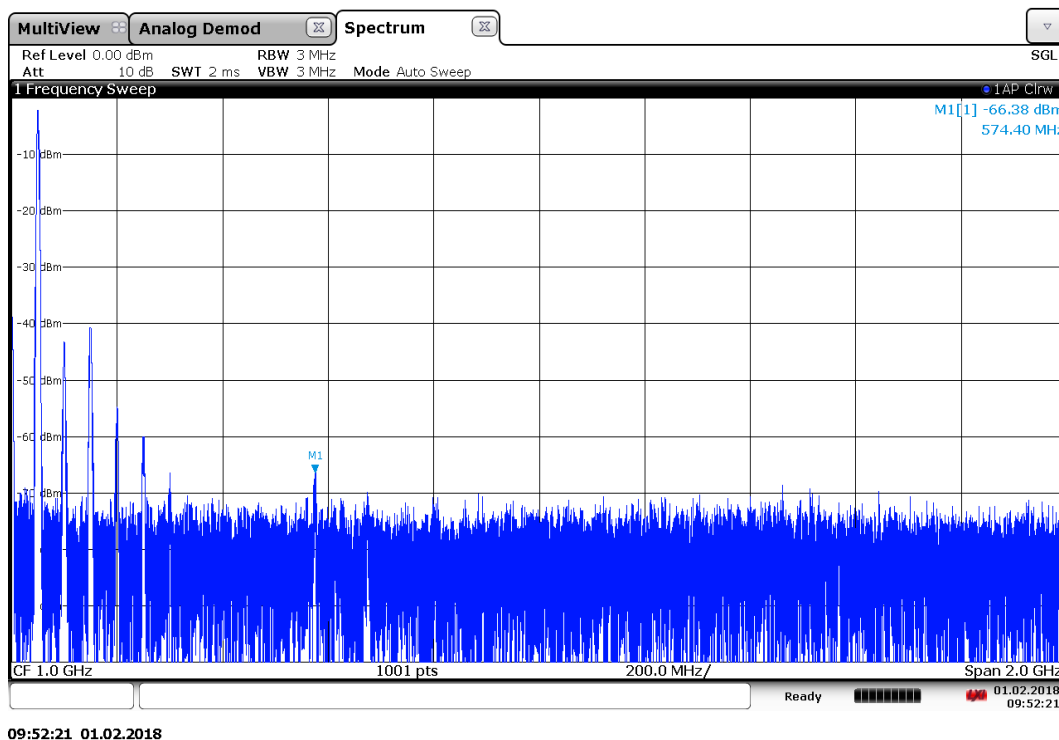


Рис. 2. Спектр выходного сигнала генератора 81160А

На рисунке 3 в спектре демодулированного сигнала присутствует составляющая 284 кГц, где парциальное значение девиации частоты составляет 22 Гц, и другие заметные составляющие.

Некоторые из этих составляющих присутствуют в спектре выходного сигнала только при включении режима модуляции, а в режиме непрерывной генерации отсутствуют. Зависит спектральный состав и от установленной частоты модуляции, причём в спектре присутствуют сигналы частот не кратных частоте модуляции. Для уменьшения влияния паразитных составляющих в режиме ЧМ достаточно эффективным приёмом является увеличение амплитуды сигнала до максимального значения. Соотношение сигнал/шум увеличивается, а необходимый уровень можно устанавливать внешним аттенуатором.

Кроме паразитных составляющих, которые можно каким-либо образом отфильтровать, в сигнале генератора имеется остаточная девиация частоты.

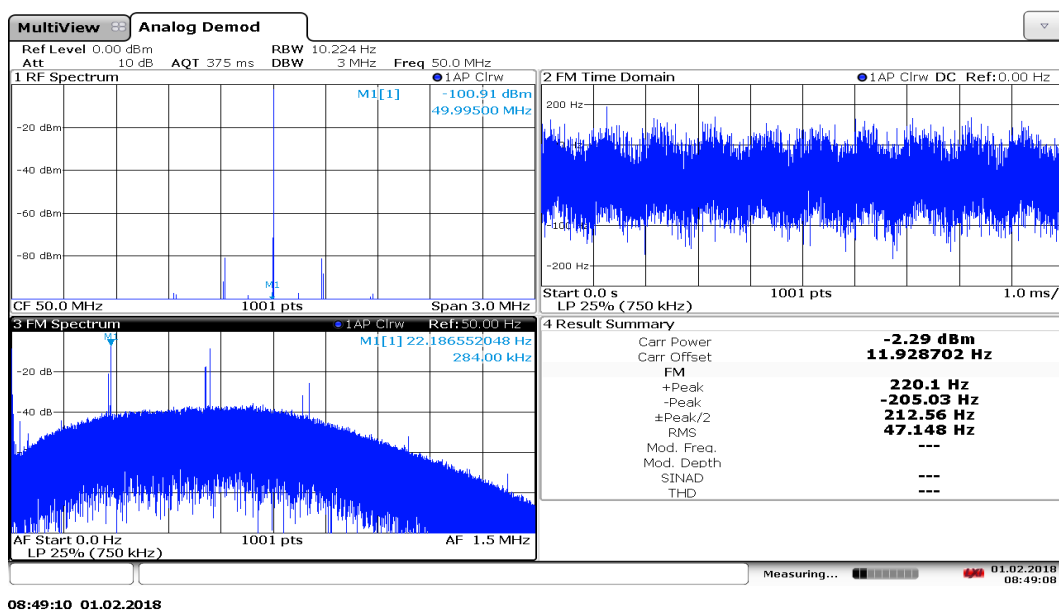


Рис. 3. Паразитные составляющие в спектре демодулированного сигнала

Экспериментально обнаружено, что на несущей частоте 50 МГц генератор 81160А не может установить значение девиации частоты менее 18 Гц при модулирующей частоте 1 кГц. Для различных генераторов данного типа это «остаточное» значение составляет от 18 до 30 Гц при установке минимального значения девиации «1 мкГц» — рисунок 4.

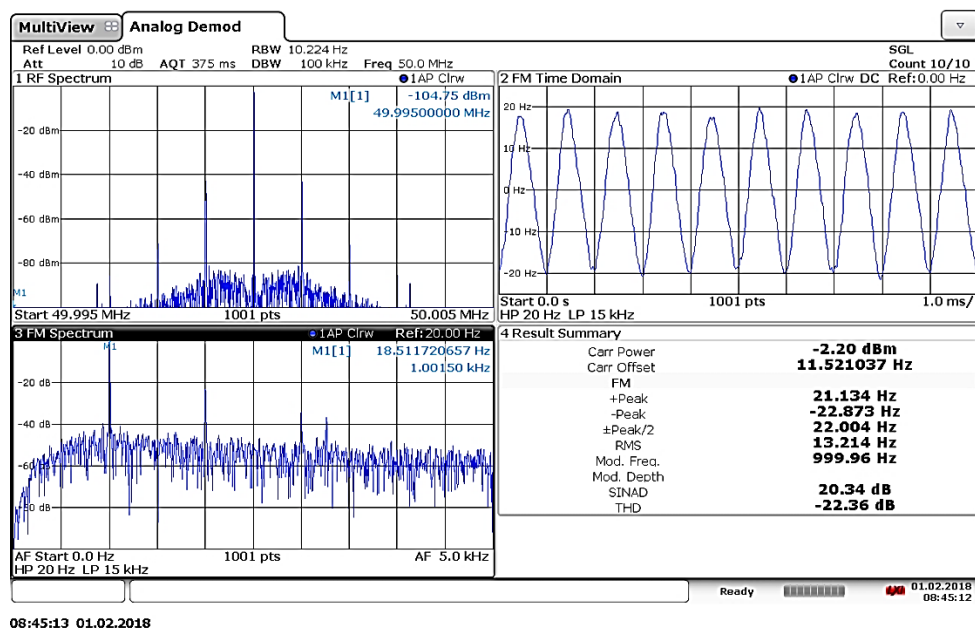


Рис. 4. «Остаточное» значение девиации частоты генератора 81160А

Было установлено, что с увеличением несущей частоты это остаточное значение пропорционально увеличивается.

В диапазоне модулирующих частот «остаточное» значение девиации частоты изменяется. На рисунке 5 приведена диаграмма, где на основе экспериментальных данных видна зависимость остаточного значения девиации от модулирующей частоты.

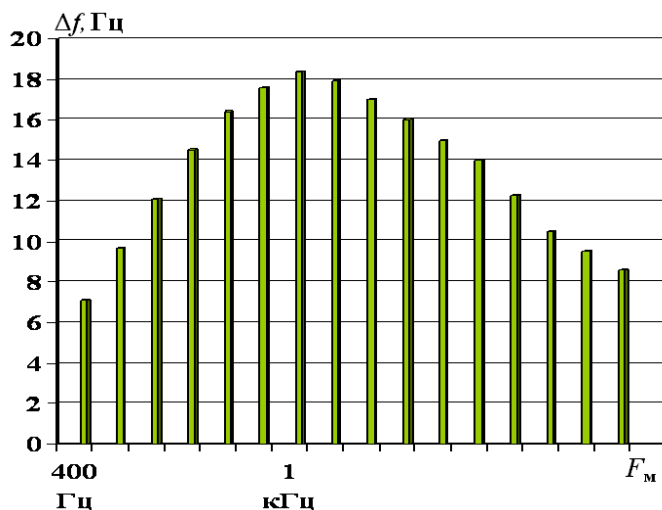


Рис. 5. Зависимость остаточного значения девиации частоты от модулирующей частоты

При малых и больших модулирующих частотах остаточное значение девиации меньше аддитивной составляющей неисклѳѳенной систематической погрешности, и её влиянием можно пренебречь. Но при модулирующих частотах от 100 Гц до 10 кГц вклад этой составляющей значителен, и его следует учитывать.

Сопоставление характеристик эталонного калибратора девиации частоты и генератора 81160А указывает на явное превосходство последнего. Во-первых, вместо фиксированной несущей частоты генератор воспроизводит ЧМ сигнал в широком диапазоне частот. Во-вторых, максимальное значение девиации частоты может быть увеличено до 10 МГц и более. В-третьих, коэффициент гармоник ЧМ сигнала на порядок меньше. И наконец, перед измерениями не требуется проводить калибровку генератора.

Что касается замены эталонного калибратора коэффициента АМ на генератор с цифровым синтезом сигнала, то на настоящий момент можно рекомендовать такую замену только в диапазоне несущих частот до 23 МГц (генератор SMB100А). При этом коэффициент АМ остаѳѳся зависимым от уровня мощности генератора. При формировании АМ сигналов следует также обратить внимание на нелинейность выходных узлов генератора.

В частности, наличие системы автоматической регулировки мощности («ALC ON») и электронных ступеней выходного аттенюатора может внести существенное изменение коэффициента АМ от установленного значения. В [8] для генератора E8257D обнаружена значительная зависимость воспроизводимого коэффициента АМ от положения выходного аттенюатора. Уменьшая ослабление аттенюатора от минус 10 до минус 20 дБ относительно 1 мВт, можно получить изменение коэффициента АМ на 5 % и более.

При воспроизведении малых значений коэффициента АМ также возникают определённые сложности. Как правило, при измерении коэффициента АМ равного 0,1 % определяют не пиковое, а среднеквадратическое значение, которое составляет 0,071 %. Если число разрядов ЦАП не очень велико, то он воспроизведёт пиковое значение 0,1 %, а среднеквадратическое значение при этом оказывается меньше (на практике, от 0,052 до 0,068).

Цифровой анализ лежит в основе принципа действия первичных эталонов [1] и [2], и этому имеются свои обоснования. Характеристики эталонных измерителей (также как и при синтезе) зависят от быстродействия и разрядности АЦП. В настоящее время быстродействующие АЦП входят в состав таких универсальных средств измерений, как осциллографы и анализаторы спектра (анализаторы сигналов).

Принципиально измерение больших значений девиации частоты можно осуществить методом экстремальных значений периода современным цифровым осциллографом [9]. При этом достигается высокая точность измерений. Экспериментально установлено, что разница в определении девиации частоты двумя независимыми методами — методом экстремальных значений и методом прямого цифрового синтеза — составила менее 0,01 % в диапазоне модулирующих частот от 30 до 200 кГц при значении девиации 10 МГц [9]. К сожалению, метод экстремальных значений трудно реализуется с помощью цифрового осциллографа для меньших значений девиации частоты из-за значительного уровня частотных шумов. Тем не менее в диапазоне значений девиации частоты от 1 до 10 МГц он может быть рекомендован как независимый метод для установления размера единицы девиации частоты. Одно из преимуществ данного метода — возможность расширения диапазона модулирующих частот до 1 МГц.

Стандартным способом снижения шумов является фильтрация сигнала. Именно хорошая фильтрация сигнала анализаторами спектра позволяет существенно расширить диапазон измеряемых значений девиации частоты. Современные анализаторы спектра, анализаторы сигнала и измерительные приёмники применяют цифровой анализ сигнала промежуточной частоты. Функция аналогового демодулятора, имеющаяся в современных анализаторах, позволяет не только отфильтровать сигнал известной модулирующей частоты, но и определить сразу несколько параметров сигнала. На рисунке 4

видно, что на экране «Result Summary» определяются сразу 9 параметров демодулированного сигнала.

Относительная погрешность измерения девиации частоты для современных анализаторов спектра может находиться в пределах $\pm 0,3\%$. Причём на низких модулирующих частотах (менее 20 кГц) погрешность укладывается в указанные пределы с большим запасом, а на модулирующих частотах ~ 200 кГц шумовая составляющая сигнала заметно возрастает, и гарантируемая погрешность измерения достигается только при точном подборе параметров фильтров. Среди существующего парка анализаторов спектра (сигналов) можно выделить как наиболее точные средства измерения девиации частоты анализаторы FSW, N9040B, SPN9003A, SPN9026A. Данные средства измерений могут быть поверены как рабочие эталоны.

Специфика цифровых анализаторов сигналов по физической сути схожа с рассмотренными особенностями цифровых формирователей, т.к. в анализаторах имеется гетеродин, спектр которого также может содержать паразитные составляющие. Кроме того, могут формироваться интермодуляционные искажения, гармоники сигнала, помехи внутри устройства. Например, при измерении одним из анализаторов спектра (с аналоговым демодулятором) девиации частоты на модулирующей частоте 100 кГц результаты измерений оказались очень нестабильными. Но достаточно было измерить результат при небольшой отстройке — 99,9 кГц, и разброс результатов существенно уменьшился. Результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2

Фм, кГц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Дисперсия
100	86,56	85,66	86,72	84,59	85,93	86,00	82,71	86,77	86,6	82,96	2,326
99,9	89,594	89,594	89,607	89,592	89,567	89,621	89,649	89,604	89,667	89,603	$8,5 \cdot 10^{-4}$

Цифровой анализ АМ сигналов возможен с помощью тех же указанных выше анализаторов спектра (сигнала) примерно с такой же относительной погрешностью. Но при этом всегда необходимо подбирать такой уровень сигнала, где погрешность измерения минимальна. При больших уровнях (~ 10 мВт) проявляются нелинейные искажения, а при малом уровне — шумы источника и самого анализатора спектра.

Вывод. Цифровой анализ и синтез АМ и ЧМ сигналов применим как для рабочих эталонов единиц девиации частоты и коэффициента АМ, так и для первичного эталона единицы девиации частоты. Кроме ряда технических преимуществ, цифровой анализ и синтез позволяет реализовать два независимых метода установления размера единицы девиации частоты и повысить точность измерения.

Литература

1. 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. 2011. № 12. С. 6–11.
2. Платонов Ф.А., Ахромеева Е.О., Бабарыкин В.А., Пругло А.В., Безденежных С.В., Каминский О.В., Стальнова К.А. Государственный первичный эталон единицы коэффициента гармоник в диапазоне 0,001–100 % для сигналов с основной гармоникой в диапазоне частот 10–200000 Гц ГЭТ 188-2010 // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 3–6.
3. Мыльников А.В., Тищенко В.А. Государственный специальный эталон единицы девиации частоты // Измерительная техника. 2005. № 1. С. 36–39.
4. Мыльников А.В., Тищенко В.А. Государственный первичный эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 10–14.
5. Бондарь С.Г., Галыго А.В., Мыльников А.В. Результаты международных сличений эталонов единицы коэффициента АМ / Тезисы докладов IX Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике» 17–19 июня 2014 г. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». С. 225–226.
6. Мыльников А.В., Пивак А.В. Калибратор амплитудно- и частотномодулированных сигналов на базе векторного генератора // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 37–40.
7. Мыльников А.В., Болмусов Ю.Д. Современное состояние и перспективы развития эталонных средств измерений и синтеза ЧМ сигналов / Тезисы докладов X Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике» 20–22 июня 2016 г. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». С. 9–12.
8. Мыльников А.В. Цифровые методы измерения и синтеза АМ и ЧМ сигналов в эталонных средствах измерений / Тезисы докладов IX Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике» 17–19 июня 2014 г. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». С. 229–231.
9. Могилев И.В. Исследование погрешности измерения девиации частоты для метода экстремальных значений / Материалы конференции «Метрология в радиоэлектронике» 19–21 июня 2018 г. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». С. 222–224.