

УДК 621.317.846

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИОЧАСТОТНОГО И ЦИФРОВОГО ТРАКТА СВЧ ШИРОКОПОЛОСНОГО АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА

В.Н. ПУТИЛИН, С.В. ЗДОРОВЦЕВ, А.В. МЕЛЬНИКОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 8 июля 2013

Рассмотрены вопросы улучшения рабочих характеристик радиочастотного цифрового тракта СВЧ многофункциональных измерительных приборов в диапазоне до 8 ГГц. Выполнена разработка двухпетлевой системы фазовой автоподстройки частоты с использованием интегральных синтезаторов на основе генераторов, управляемых напряжением и синтезаторов прямого цифрового синтеза на элементной базе высокой степени интеграции, которая позволила реализовать требуемые параметры. Проведены исследования метода коррекции дисбаланса квадратурных составляющих сигнала в цифровом тракте промежуточной частоты, учитывающие требования к многофункциональному режиму работы измерительного прибора.

*Ключевые слова:* анализатор сигналов, многофункциональность, квадратурный демодулятор, коррекция дисбаланса.

### Введение

Разработка и наладка СВЧ радиоэлектронных устройств невозможна без комплекса приборов, которые обеспечивают измерение частоты гармонических и импульсных источников СВЧ, оценку выходного спектра передающих устройств и т.д. Процесс измерений при этом усложняется ввиду большого количества требуемых разнообразных приборов. Поэтому среди ведущих производителей измерительной техники наблюдается тенденция к созданию многофункциональных СВЧ измерительных трактов, обеспечивающих возможность измерения нескольких параметров и которые объединяют функциональные возможности анализатора спектра общего назначения, анализатора сигналов, высокочастотного (ВЧ) и низкочастотного (НЧ) вольтметра, измерителя мощности и т. д.

Разработка проводилась в соответствии со следующими принципами:

- анализ и выбор параметров измерительного тракта, требуемых для решения измерительных задач при расширении функциональных возможностей измерительного прибора;
- максимальная гибкость, позволяющая, изменять конфигурацию измерительного тракта, включая программное управление параметрами радиочастотного и цифрового тракта в реальном времени;
- разработка методов улучшения параметров измерительного тракта;
- максимальное упрощение аппаратной части устройства и доступность элементной базы.

В статье рассмотрены задачи улучшения параметров СВЧ радиочастотного тракта и цифрового тракта промежуточной частоты (ПЧ) многофункционального измерительного прибора.

## Задачи и методы измерения параметров радиочастотного тракта в многофункциональных СВЧ измерительных приборах

Основной задачей измерительного приемного тракта анализатора спектра, является обеспечение высокой вероятности обнаружения и точности измерения сигнала, которое зависят от многих факторов. Во-первых, это обеспечение достаточно широкой полосы пропускания приемного устройства до детектора, которая на широкополосном выходе промежуточной частоты приемника должна повторять форму огибающей спектра радиосигнала. Во-вторых, для обеспечения возможности анализа сигнала в любой заданной полосе в пределах полезного участка спектра, необходима реализация блока синтезирования частот гетеродина с заданной полосой, малыми фазовыми шумами и малым шагом перестройки частоты гетеродина (до 0,1 Гц) [1].

Авторами статьи длительное время проводилась разработка СВЧ устройств и методов улучшения параметров радиочастотных СВЧ трактов измерительных приборов, включая задачи создания многофункциональных измерительных приборов [2], которые предъявляют дополнительные требования к линейности, наличию и малому уровню «спуров» (неконтролируемых выбросов сигнала гетеродина) во всей полосе частот и т.д.

На рис. 1 показана разработанная и изготовленная схема СВЧ тракта анализатора спектра, на базе которой проводились исследования [3]. Особенностью выполненной работы является исследование возможности минимизации фазовых шумов на основе широкополосного синтезатора частоты на основе ГУН (генератора, управляемого напряжением) без применения генератора с использованием ЖИГ-сферы (железо-иттриевый гранат).

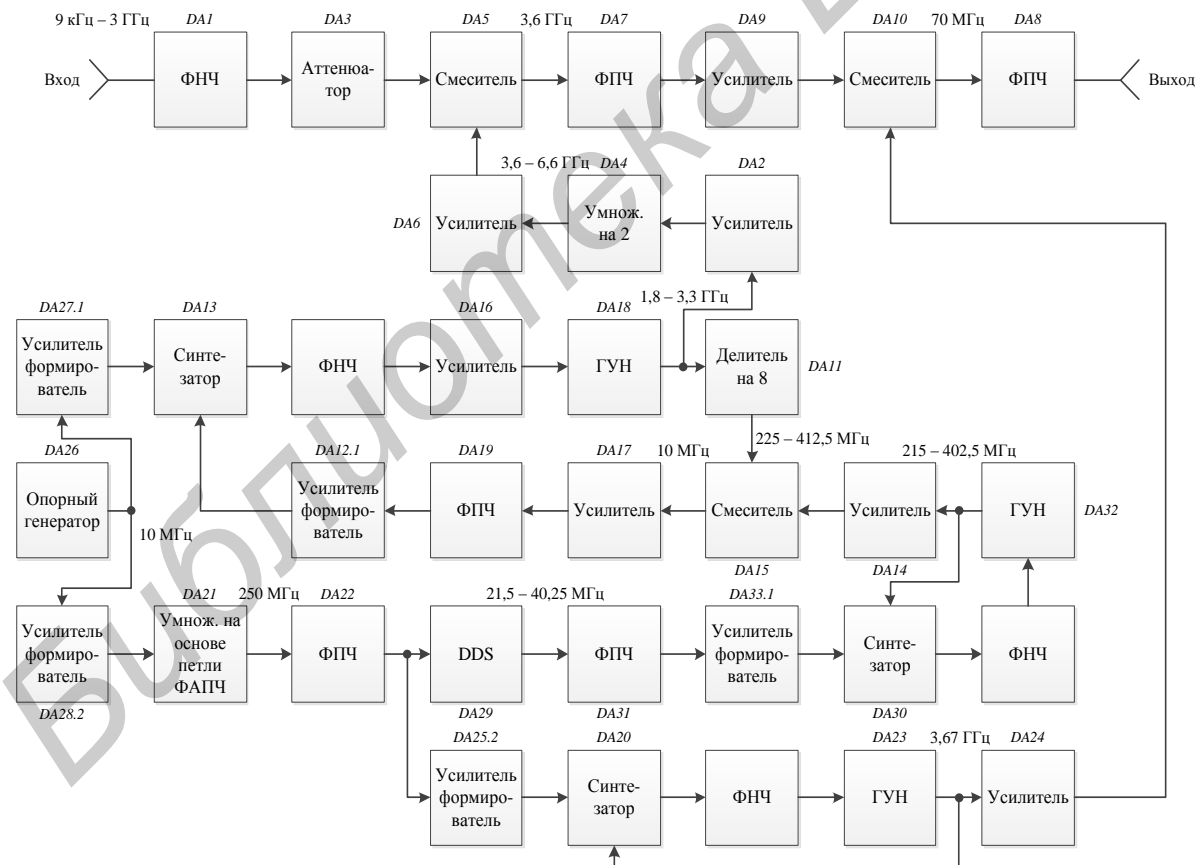


Рис. 1. Блок-схема СВЧ анализатора спектра с использованием двухпетлевой системы ФАПЧ

Блок СВЧ гетеродина содержит две петли ФАПЧ (фазовой автоподстройки частоты) и образован тремя синтезаторами частоты, на которых собраны схемы 1-го и 2-го гетеродина анализатора спектра. Высококачественная петля ФАПЧ построена на использовании делителя частоты с небольшим коэффициентом деления (до 8) и смесителя частоты, формирующего

разностную промежуточную частоту, равную опорной (рис. 1). Низкочастотная петля ФАПЧ выполнена с использованием перестраиваемого источника опорных колебаний на основе синтезаторов прямого цифрового синтеза DDS (Direct Digital Synthesis). На оба синтезатора с ФАПЧ через усилители – формирователи DA27.1 и DA28.2 – поступает сигнал высокостабильного опорного генератора DA26.

Схема 1-го перестраиваемого гетеродина включает умножитель опорной частоты DA21 на основе петли ФАПЧ, после которого опорный сигнал с частотой 250 МГц поступает на синтезатор частоты прямого синтеза DDS, задающий величину шага перестройки синтезатора DA30 и синтезатора DA13, сигнал на который поступает через смеситель DA15. Выходной ГУН работает в диапазоне частот 1,8–3,6 ГГц через усилитель DA2, умножитель частоты DA4 и усилитель DA6. Сигнал с выхода ГУН поступает на 1-й смеситель через усилитель DA2, умножитель частоты DA4 и усилитель DA6. Схема второго гетеродина выполнена на синтезаторе DA20 на частоту 3670 МГц, так как фильтр первой ПЧ настроен на полосу частот 3600 МГц с полосой пропускания около 100 МГц. С выхода второго смесителя сигнал второй ПЧ на частоте 70 МГц поступает на выход СВЧ блока и вход цифрового блока для оцифровки и последующей обработки.

Экспериментальные исследования разработанного СВЧ тракта (рис. 1) показали возможность расширения метрологических характеристик с целью создания многофункциональных измерительных приборов: увеличение разрешающей способности (сужение минимального фильтра промежуточной частоты от 100 Гц до 10 Гц/1 Гц); уменьшение абсолютной погрешности амплитудных измерений (от 2–3 дБ до 0,6 дБ и ниже); снижение уровня фазовых шумов (от типовых значений –100 дБн/Гц до –120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц от несущих порядка 1 ГГц); низкий уровень нелинейных искажений и повышение интермодуляционной динамики (от средних значений в +15 дБм до значений +25 дБм), увеличение скорости измерений.

Проведенные исследования важнейших узлов позволили сделать выводы об основных направлениях разработки и улучшения параметров элементов и узлов измерительного СВЧ тракта, необходимых для расширения функциональности.

1. Уменьшение шага установки ослабления входного аттенюатора СВЧ тракта менее 1 дБ; Можно отметить, что применение аттенюаторов с малым шагом вносимого ослабления часто затруднительно из-за необходимости обеспечить одновременно широкую полосу рабочих частот, высокий и быстро изменяющийся уровень мощности входного сигнала, при высокой точности контроля параметров сигналов. Наличие аттенюатора с малым шагом ослабления позволит определить также, являются ли отображаемые компоненты истинными входными сигналами, или внутренне генерируемыми сигналами, например, «спуры» гетеродина, которые изменяются при изменении ослабления, вносимого аттенюатором.

2. Уменьшение уровня нелинейных искажений и расширение связанного с ним динамического диапазона, что обеспечивается работой входного смесителя в линейном режиме. Нельзя допускать перегрузку смесителя анализатора, так как она может вызвать в выходном спектре сигналы на комбинационных частотах. Основным источником появления лишних компонентов в наблюдаемом сигнале, являются нежелательные продукты преобразования, генерируемые в смесителе, особенно если они попадают на те же частоты, на которых находятся составляющие входного сигнала. Динамический диапазон измерительного тракта в этом случае можно определить как отношение в дБ, наибольшего и наименьшего сигналов, одновременно присутствующих на входе смесителя, при котором измерение наименьшего сигнала происходит с заданной степенью погрешности.

3. Установка встроенного предусилителя перед смесителем. Это позволит расширить диапазон уровней сигнала от –150–160 дБм до +30 дБм, что обеспечит высокую чувствительность, необходимую для обнаружения малых сигналов.

4. Улучшение шумовых характеристик в диапазоне до 8 ГГц (в котором требуется наибольшая функциональность измерительного тракта) может быть достигнуто использованием рассмотренной двухпетлевой системы ФАПЧ на основе ГУН.

## Задачи и направления оптимизации параметров цифрового тракта многофункциональных СВЧ измерительных приборов

Для цифрового тракта СВЧ анализатора можно выделить три основных направления улучшения параметров и расширения функциональности, которые реализованы в проведенных исследованиях:

- использование широкой полосы анализа (более 20 МГц);
- обработка сигналов в реальном времени, что повышает качество демодуляции нестационарных сигналов и сигналов цифровых форматов;
- улучшение параметров цифрового тракта промежуточной частоты и повышение качества Фурье-анализа.

Проведено моделирование цифрового тракта с определением источников погрешностей, наиболее важным из которых является дисбаланс IQ (incident-quadrature) составляющих квадратурного преобразования. Предложена блок–схема многофункционального СВЧ измерительного прибора (рис. 2) с программируемой обработкой результатов измерений в реальном времени, реализующая рассмотренные требования, в которой используются методы коррекции дисбаланса IQ составляющих сигнала в ПЧ тракте, учитывающие требования к многофункциональному режиму работы измерительного прибора.

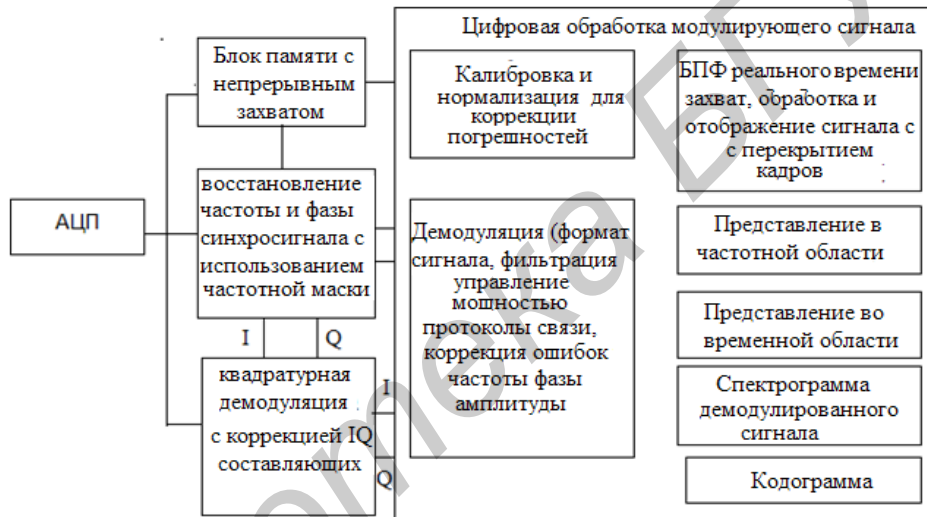


Рис. 2. Блок-схема многофункционального СВЧ измерительного прибора с программируемой обработкой результатов измерений в реальном времени

Одной из наиболее важных задач является задача уменьшения амплитудного и фазового дисбаланса IQ составляющих. Для простого сигнала можно использовать временную коррекцию, которая дает хорошие результаты при компенсации амплитудного IQ дисбаланса.

Для проведения измерений параметров сложных или быстроизменяющихся сигналов или сигналов цифрового формата целесообразно использовать БПФ (быстрое преобразование Фурье) и частотную коррекцию, позволяющую эффективно выполнить оценку амплитудного и фазового дисбаланса.

В общем случае выражения для напряжений на выходах синфазного и квадратурного подканалов демодулятора можно записать в виде функций от времени  $t$ :

$$I = A \cos(2\pi f t + \varphi); \quad Q = A(1 + g) \sin[2\pi f t + (\varphi - \psi)], \quad (1)$$

где  $g$  – амплитудная погрешность каналов;  $\psi$  – фазовая погрешность;  $f$  – частота сигнала;  $\varphi$  – начальная фаза сигнала.

Уравнение для комплексных IQ составляющих разбаланса могут быть записаны в виде

$$\hat{s}(t) = \cos(2\pi f t) - jg \sin(2\pi f t + \psi). \quad (2)$$

Тогда комплексный результат квадратурного преобразования можно представить в виде суммы желательных и нежелательных компонент [4]

$$\hat{y}(t) = K_1 e^{-2\pi ft} + K_2 e^{2\pi ft}, \quad (3)$$

$$K_1 = (1 + g e^{-j\psi}) / 2; \quad K_2 = (1 - g e^{-j\psi}) / 2. \quad (4)$$

Удобно  $K$  представить в виде матрицы коэффициентов, связывающей желательные и нежелательные компоненты сигнала

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ \hat{K}_1 & \hat{K}_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Реальная и мнимая часть комплексных произведений коэффициентов связи позволяет определить величину дисбаланса и рассчитать матрицу компенсирующих коэффициентов. После чего используется обратное БПФ для формирования IQ составляющих. Результатом является уменьшение содержания нежелательных компонент в выходном сигнале устройства коррекции, показанное на рис. 3.

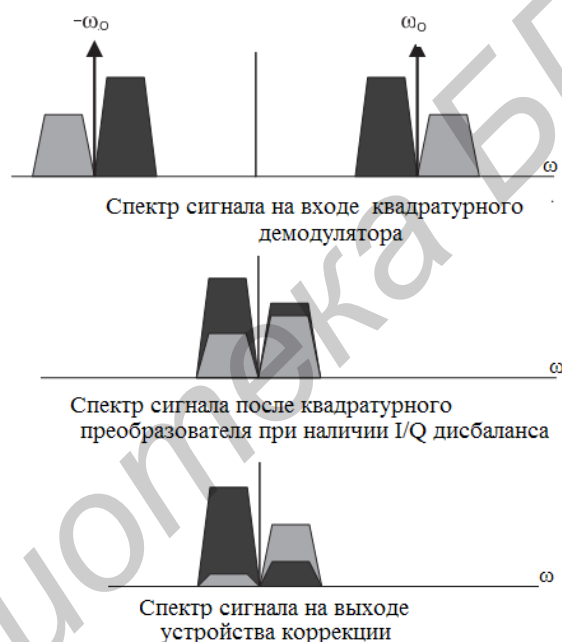


Рис. 3. Спектр сигнала в тракте ПЧ и на выходе устройства коррекции

Из связи желательных и нежелательных компонент сигнала следует, что внутренняя структура группового сигнала после БПФ влияет на параметры составляющих IQ дисбаланса. При этом изменение сигнала (сдвиг анализируемой полосы частот или изменение функции измерений, то есть обработка других частотных составляющих в измеряемом сигнале), приводит к изменению величины дисбаланса и необходимости заново проводить расчет компенсирующих коэффициентов.

Это говорит о том, что обновление статистического набора информации после БПФ должно производиться в заданном участке диапазона для каждой выполняемой функции, что и позволяет получить необходимые значения компенсирующих коэффициентов в каждом конкретном случае (рис. 4).

Такой алгоритм повышения точности измерений для многофункционального измерительного приемника очевидно может эффективно выполняться только при высоком качестве БПФ, а также при работе в реальном времени. При этом для повышения качества демодуляции и точности измерений должен использоваться режим работы БПФ с перекрытием (overlapping), выбор порога уровня полезного сигнала, а также подбор аппроксимации коэффициента коррекции.

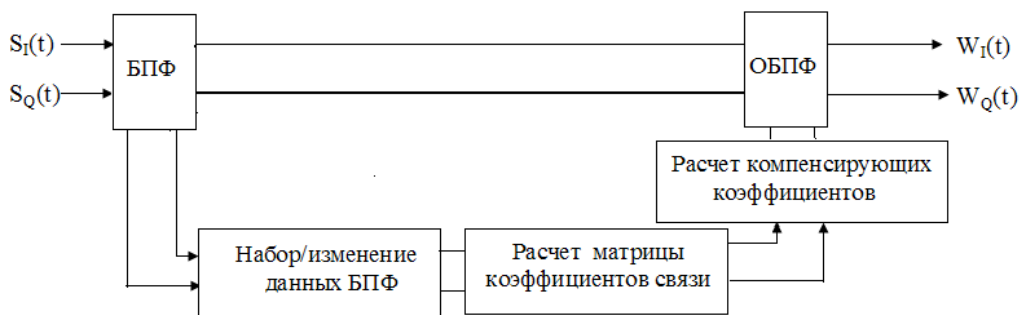


Рис 4. Структурная схема устройства коррекции IQ дисбаланса

Анализ возможности улучшения параметров многофункциональных измерительных приборов по предложенной блок-схеме позволил сделать следующие выводы.

1. Работа устройства коррекции происходит в режиме реального времени, обязательного для синхронизации, регистрации и анализа динамических сигналов и переходных процессов; к тому же позволяет повысить точность измерений параметров измеряемых аналоговых и цифровых сигналов для всех применений в многофункциональных измерительных приборах.

2. Полоса пропускания в реальном масштабе времени может располагаться в любом месте в пределах частотного диапазона измерительного прибора (в зависимости от измерительной задачи) и ее величина обычно ограничена частотой дискретизации аналогово-цифрового преобразователя и полосой пропускания, для которой тракт промежуточной частоты прибора имеет линейные частотную и фазовую характеристики.

3. С использованием работы в реальном масштабе времени пользователь может обнаруживать и определять характеристики динамических сигналов в полосе пропускания в любой момент в пределах блока непрерывной записи данных во временной области.

4. Уточнение параметров БПФ, в зависимости от ширины анализируемого диапазона частот и выполняемой функции, является основной задачей в работе устройства коррекции и требует дальнейших исследований.

### Заключение

Исследования в области создания многофункциональных СВЧ измерительных трактов, обеспечивающих возможность измерения нескольких параметров и объединяющих функциональные возможности анализатора спектра общего назначения, анализатора сигналов, ВЧ, НЧ вольтметра, измерителя мощности и т.д., весьма актуальны.

Проведены экспериментальные исследования радиочастотного СВЧ тракта с использованием двухпетлевой системы ФАПЧ на основе ГУН с улучшенными шумами, до  $-110$  дБ/Гц на расстоянии  $10$  кГц от несущей в полосе до  $3$  ГГц.

Проведены экспериментальные исследования важнейших элементов радиочастотного тракта и определены направления улучшения параметров важнейших узлов, необходимые для создания многофункциональных СВЧ измерительных приборов.

Предложена структурная схема цифрового тракта ПЧ многофункционального СВЧ измерительного прибора.

Показано, что основной задачей улучшения параметров цифрового тракта является коррекция амплитудных и фазовых погрешностей IQ составляющих квадратурного преобразования. Предложен алгоритм коррекции, учитывающий многофункциональность работы, который требует обновления статистического набора информации для проведения БПФ при изменении полосы частоты или рабочей функции измерительного прибора, а также работы БПФ в режиме реального времени с перекрытием данных, выбора порога уровня полезного сигнала и подбора аппроксимации коэффициента коррекции.

Результаты моделирования алгоритма коррекции показывают, что в зависимости от начального дисбаланса по фазе около  $3-5$  градусов и по амплитуде более  $2-3$  % (типичные

значения для современных интегральных квадратурных демодуляторов) степень подавления зеркального канала может достигать величины более 50 дБ.

Результаты работы планируется использовать для разработки многофункциональных СВЧ измерительных приборов и улучшения их характеристик.

## **OPTIMIZATION PARAMETERS OF MICROWAVE SPECTRUM ANALYZER RADIOFREQUENCY AND DIGITAL PATH**

V.N PUTILIN, S.V. ZDOROVITSEV, A.V. MELNIKOV

### **Abstract**

The paper deals with improving the performance of the RF path and the digital path of microwave multi-function measuring devices into range up to 8 GHz. Development of the two-loop PLL system was performed using a VCO and DDS and allowed us to realize the required parameters of measuring devices. Additionally, the development and research of IQ imbalance correction method of quadrature components of the signal in a digital IF path was carried out, which enabled to reduce the signal distortions and incorporate the requirements for multi-function measuring devices

### **Список литературы**

1. *Путилин В.Н, Здоровцев С.В.* // Матер. 17-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии «КрыМиКо-2007». Крым, 10–14 сентября 2007. С. 255–256.
2. *Путилин В.Н, Здоровцев С.В.* // Матер. 19-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии «КрыМиКо-2009». Крым, 14–18 сентября 2009. С. 289–290.
3. *Путилин В.Н., Здоровцев С.В.* // Матер. 19-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии «КрыМиКо-2012». Крым, 10–14 сентября 2012. С. 837–839.
4. *Moseley N., Slump C.* // 17th Annual Workshop on Circuits. Veldhoven, 23–24 November 2006. P. 158–164.