
СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТУРЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ РАДИОСВЯЗИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ

Фатеева Анна Сергеевна

Омский государственный технический университет, г. Омск

Аспирант

fateewa16@rambler.ru

В статье представлены способы построения аппаратуры широкополосной радиосвязи с использованием современных квадратурных модуляторов и демодуляторов, быстродействующих аналогово-цифровых преобразователей и цифро-аналоговых преобразователей. Выполнен анализ технических характеристик современных электронных компонентов с целью определения возможности их применения для построения аппаратуры широкополосной радиосвязи, соответствующей современным стандартам. Показано, что применение современных быстродействующих аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей и использование методов прямого цифрового синтеза и обработки сигналов позволяет в значительной мере снизить массогабаритные показатели и повысить спектральные характеристики аппаратуры широкополосной радиосвязи с частотным диапазоном до 9 ГГц.

Ключевые слова: аппаратура широкополосной радиосвязи, квадратурный модулятор, квадратурный демодулятор, быстродействующие аналогово-цифровые преобразователи, быстродействующие цифро-аналоговые преобразователи, методы прямого цифрового синтеза и формирования сигналов.

APPROACH FOR CREATION OF BROADBAND RADIO COMMUNICATION DEVICES USING NOVEL ELECTRONIC COMPONENTS

Anna S. Fateeva

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Graduate student

ABSTRACT

The article presents methods for constructing broadband radio equipment using modern quadrature modulators and demodulators, high-speed analog-to-digital converters and digital-to-analog converters. The analysis of the technical characteristics of modern electronic components in order to determine the possibility of their use for the construction of broadband radio equipment that meets modern standards. It is shown that the use of modern high-speed analog-to-digital and digital-to-analog converters and the use of methods of direct digital synthesis and signal generation can significantly reduce the weight and size parameters and improve the spectral characteristics of broadband radio equipment with a frequency range up to 9 GHz.

Keywords: wideband radio communication devices, high-speed analog-to-digital converters, high-speed digital-analog converters, system on chip, methods of direct digital synthesis and signal processing.

Введение

Одним из основных направлений развития современных систем передачи информации является повышение скорости передачи информации. Для систем передачи информации по радиоканалу повышение скорости передачи информации приводит к расширению полосы частот передаваемых сигналов. Например, для первоначальных стандартов мобильной связи третьего поколения (3G) с максимальной скоростью передачи информации до 5,5 Мбит/с полоса частот сигнала составляла не более 5 МГц, то для стандартов связи четвертого поколения (4G) со скоростью передачи информации до 100 Мбит/с полоса частот сигналов составляет уже 20 МГц и более [1].

Расширение полосы частот, передаваемых сигналов, неизбежно ведет к ограничению свободных участков радиочастотного диапазона. Это является одним из факторов для повышения радиочастотных диапазонов и ужесточению требований к спектральной чистоте сигналов в существующих и вновь создаваемых стандартах связи. Для соответствия современным стандартам, аппаратура широкополосной радиосвязи должна обладать высокими спектральными характеристиками. Кроме того, создаваемая аппаратура широкополосной радиосвязи должна иметь расширенный частотный диапазон и предусматривать возможность для последующей модернизации. Для построения такой аппаратуры радиосвязи необходимо использование современных электронных компонентов, обладающих как расширенным частотным диапазоном, так и высокими спектральными характеристиками.

Целью данной работы является исследование и анализ способов построения аппаратуры широкополосной радиосвязи с использованием современных электронных компонентов, позволяющих обеспечить высокие спектральные характеристики, соответствующие современным стандартам связи. Для достижения указанной цели были проанализированы способы построения аппаратуры широкополосной радиосвязи. С учётом требований современных стандартов связи к частотному диапазону и спектральным характеристикам, выбран и обоснован способ построения аппаратуры широкополосной радиосвязи, определены типы электронных компонентов для реализации данного способа.

Анализ способов построения аппаратуры широкополосной связи. Большинство современных способов построения широкополосной аппаратуры радиосвязи основано на представлении передаваемого или принимаемого сигнала в виде линейной комбинации квадратурных составляющих сигнала:

$$Y(t) = I(t) \cos(\omega_0 t) + Q(t) \sin(\omega_0 t), \quad (1)$$

где $I(t)$, $Q(t)$ – синфазная и квадратурная составляющие сигнала, а $\cos(\omega_0 t)$ и $\sin(\omega_0 t)$ – сигнатура и квадратура несущего сигнала.

Как правило, $I(t)$ и $Q(t)$ называют квадратурными составляющими сигнала, а процесс преобразования сигнала в соответствии с выражением (1) – квадратурной модуляцией. Устройство, которое осуществляет квадратурную модуляцию называют квадратурным модулятором (КМ) [2].

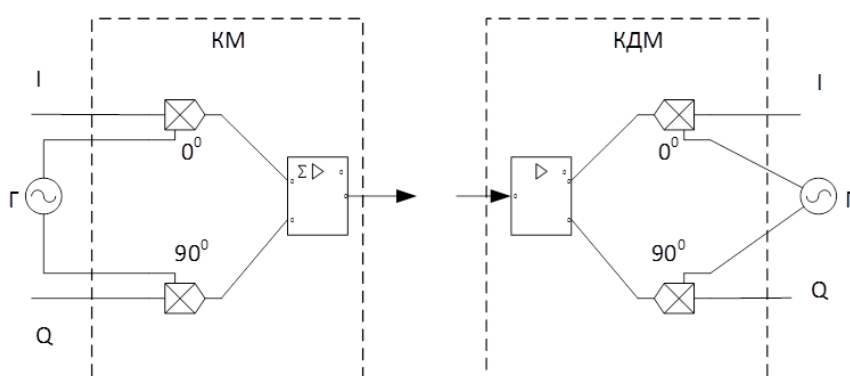


Рис. 1. Структурные схемы квадратурного модулятора (КМ) и квадратурного демодулятора (КДМ).

Как представлено на рисунке 1, КМ имеет два входа синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющей, которые умножаются на соответствующий сигнал от высокочастотного генератора (Г) и затем суммируются для получения высокочастотного модулированного колебания. Такая схема включения является балансной и позволяет исключить процедуру фильтрации зеркальной составляющей сигнала. Аналогичным образом устроен квадратурный демодулятор, только процесс преобразования сигнала происходит в обратном направлении.

В зависимости от того на какой частоте и в каком виде происходит квадратурная модуляция и демодуляция сигнала, аппаратуру широкополосной радиосвязи можно разделить на следующие типы:

1. Аппаратура на основе супергетеродинной схемы [3].
2. Аппаратура с непосредственной модуляцией и демодуляцией на высоких частотах [4].
3. Аппаратура с прямым цифровым синтезом и обработкой сигналов [5].

Аппаратура на основе супергетеродинной схемы является классической и довольно широко освещена в литературе [6].

Аппаратура с непосредственной модуляцией и демодуляцией на высоких частотах.

Аппаратура с непосредственной модуляцией и демодуляцией на высоких частотах получила широкое распространение в сетях сотовой связи, радиорелейных линиях связи, спутниковых системах связи. На рисунке 2 представлена типовая схема передающей радиоаппаратуры с непосредственной модуляцией на высоких частотах и использующая квадратурную модуляцию [4].

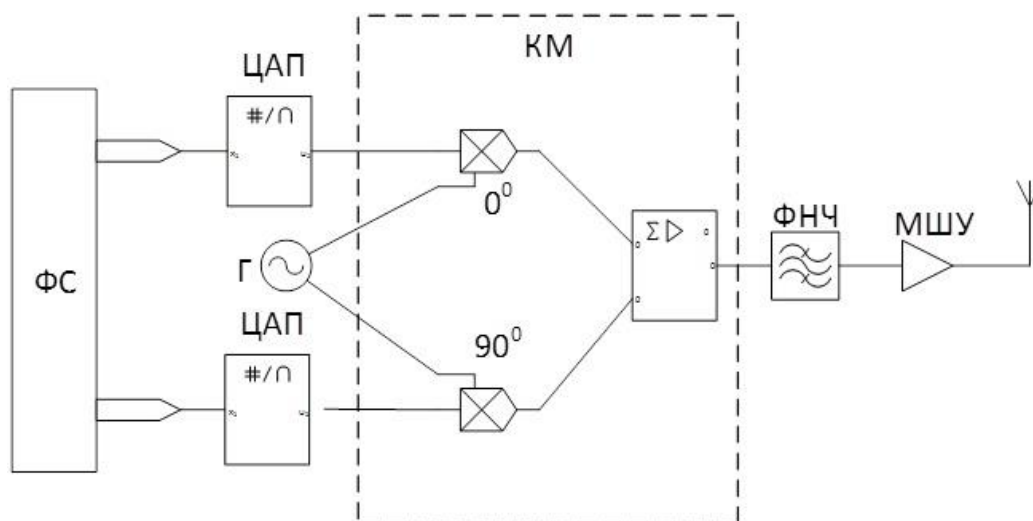


Рис. 2. Структурная схема передающей радиоаппаратуры с непосредственной модуляцией на высоких частотах.

В данной структурной схеме формирователь сигналов (ФС) формирует действительную и мнимую часть комплексной огибающей информационного сигнала, далее эти сигналы поступают на вход цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), затем уже аналоговые сигналы поступают на вход аналогового квадратурного модулятора (КМ), где происходит перенос широкополосного сигнала, представленного в виде квадратурных составляющих (действительной части и мнимой части) на необходимую частоту несущего колебания. Генератор (Г) формирует два синусоидальных сигнала несущего колебания сдвинутые по фазе друг относительно друга на 90° , чтобы обеспечить квадратурную модуляцию. Далее на выходе КМ подключен фильтр нижних частот (ФНЧ), для того чтобы избавить сформированный сигнал от нежелательных высокочастотных составляющих, возникающих при аналоговой квадратурной модуляции. С выхода ФНЧ сигнал поступает на вход маломощного усилителя (МШУ), где происходит его усиление до требуемого уровня и затем усиленный сигнал передается на антенну.

Типовая схема приёмной радиоаппаратуры с непосредственной демодуляцией на высоких частотах во многом схожа со схемой, представленной на рисунке 1, за исключением того, что процесс демодуляции является обратным процессу модуляции. На рисунке 3 представлена схема приёмной радиоаппаратуры с непосредственной демодуляцией на высоких частотах [4].

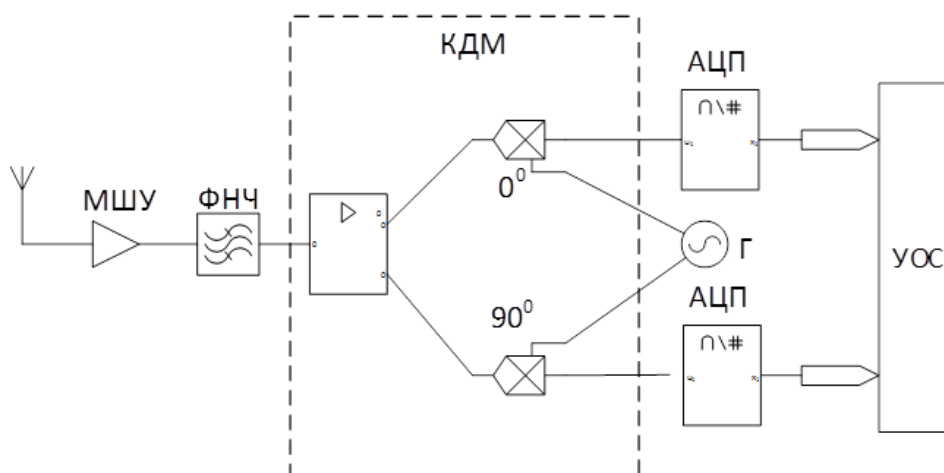


Рис. 3. Структурная схема приемной радиоаппаратуры с непосредственной демодуляцией на высоких частотах.

В данной структурной схеме высокочастотный аналоговый сигнал через антенну поступает на вход малошумящего усилителя (МШУ), далее происходит фильтрация сигнала с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ). После этого высокочастотный сигнал поступает на вход аналогового квадратурного демодулятора (КДМ), где происходит выделение квадратурных составляющих и перенос спектра сигнала на «нулевую» частоту. Сигнал с выхода КДМ поступает на вход аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и затем уже цифровой сигнал поступает на вход устройства обработки информации (УОИ).

Ключевыми компонентами для реализации аппаратуры радиосвязи с непосредственной модуляцией и демодуляцией на высоких частотах являются аналоговые квадратурные модуляторы и демодуляторы [7]. Диапазон рабочих частот таких модуляторов, как правило, составляет от 50 МГц до 6 ГГц [8]. В таблице 1 из выше указанных источников представлены параметры наиболее технически-совершенных на данный момент времени аналоговых квадратурных модуляторов и демодуляторов.

Таблица 1 - Параметры аналоговых квадратурных модуляторов и демодуляторов.

Параметры устройств	Квадратурные модуляторы		Квадратурные демодуляторы	
Наименование	TRF370417 (Texas Instr.)	ADL5375 (Analog Dev.)	TRF371125 (Texas Instr.)	ADL5380 (Analog Dev.)
Частотный диапазон, МГц	50–6000	400–6000	700–4000	400–6000
Полоса пропускания, МГц	1000	750	30	390
Подавление зеркального канала, дБ	–42	–50	–40	–50
Сквозное прохождение несущей, дБ	–40	–40	–50	–52
Искажение фазы, °	–	–	0,5	0,2
Баланс амплитуд, дБ	–	–	0,1	0,07
Приблизительная оценка параметра EVM для модуляции QAM-64, %	0.5	0.8	0.4	0.3

Как видно из представленных данных таблицы 1, аналоговые квадратурные модуляторы и демодуляторы имеют ряд существенных недостатков, а именно:

1. Высокий уровень зеркального канала.
2. Существенное искажение амплитуды и фазы сигнала.
3. Достаточно высокий уровень прохождения несущей.

Высокий уровень зеркального канала ограничивает использование представленных аналоговых квадратурных модуляторов и демодуляторов в многоканальных системах. Это

связано с тем, что уровень зеркального канала отрицательно влияет на такой критичный для многоканальных систем параметр, как уровень помехи в соседнем канале (ACPR) [9]:

$$ACPR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P_{\text{осн.кан.}}}{P_{\text{сос.кан}}} \right), \quad (2)$$

где $P_{\text{осн.кан.}}$ – средняя мощность сигнала в основном канале, $P_{\text{сос.кан}}$ – средняя мощность сигнала в соседнем канале. В современных системах связи, таких как 3GPP (LTE, LTE-A), требования к уровню помехи в соседнем канале лежит в диапазоне от 40 до 50 дБ [11]. Таким образом подавление зеркального канала на уровне от 40 до 50 дБ, как у представленных выше устройств, является недостаточным для выполнения требований современных стандартов связи.

Искажение амплитуды и фазы сигнала, присущее для аналоговых квадратурных модуляторов и демодуляторов, связано с их неидеальным аналоговым ВЧ-трактом. Количественной мерой оценки искажений амплитуды и фазы сигнала может стать такой параметр, как модуль вектора ошибки (EVM) [10]:

$$EVM = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e_k)^2}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (I_k^2 + Q_k^2)}} \times 100, \quad (3)$$

где $(e_k) = (I_k - \tilde{I}_k)^2 + (Q_k - \tilde{Q}_k)^2$, I_k – измеренная синфазная составляющая k -го символа исходного сигнала, Q_k – измеренная квадратурная составляющая k -го символа исходного сигнала, $\tilde{I}_k$ – измеренная синфазная составляющая k -го символа искажённого сигнала, $\tilde{Q}_k$ – измеренная квадратурная составляющая k -го символа искажённого сигнала, N – длина входного вектора.

Для снижения искажений в аналоговых квадратурных модуляторах и демодуляторах возможна итеративная коррекция квадратурных сигналов на этапе их формирования для модуляторов или посткоррекция в устройстве обработки сигналов для демодуляторов [12]. Однако данная процедура является весьма трудоемкой и требует значительных временных и вычислительных затрат, что снижает быстродействие конечной аппаратуры радиосвязи.

Высокий уровень прохождения несущей частоты обусловлен отсутствием полной комплексной сопряженности (квадратурного баланса) между синфазной и квадратурной составляющей внутри аналоговых квадратурных модуляторов и демодуляторов. Для восстановления квадратурного баланса возможно использования специализированных двухканальных АЦП и ЦАП, которые имеют необходимый для этого функционал.

К преимуществам аналоговых квадратурных модуляторов и демодуляторов можно отнести низкую стоимость данных компонентов.

Аппаратура с прямым цифровым синтезом и обработкой сигналов. Указанных выше недостатков можно избежать, если квадратурную модуляцию и демодуляцию осуществлять в цифровом виде. Такую возможность позволяет осуществить аппаратура с прямым цифровым синтезом и обработкой сигналов. До недавнего времени, прямой цифровой синтез и обработка сигналов не использовались в частотных диапазонах выше 1 ГГц [13]. Это было связано с ограниченным частотным диапазоном и быстродействием АЦП и ЦАП. Однако в настоящий момент существующие АЦП и ЦАП позволяют формировать и обрабатывать сигналы с частотой до 9 ГГц [14].

На рисунке 4 представлена структурная схема передающей аппаратуры радиосвязи с прямым цифровым синтезом сигналов [5].

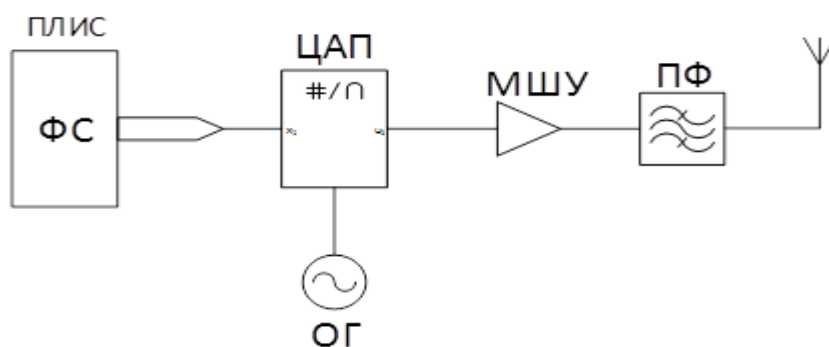


Рис. 4. Схема передающей радиоаппаратуры с прямым цифровым синтезом сигналов.

В данной структурной схеме высокочастотный сигнал формируется в цифровом виде в формирователе сигналов (ФС). Затем цифровой сигнал поступает на вход ЦАП, после этого, уже аналоговый сигнал, проходит через фильтр нижних частот (ФНЧ) и усиливается с помощью малошумящего усилителя (МШУ).

Аналогично структурной схеме передающей радиоаппаратуры с прямым цифровым синтезом сигналов, можно построить структурную схему приёмной радиоаппаратуры с прямой цифровой обработкой сигналов. На рисунке 5 представлена структурная схема приёмной аппаратуры радиосвязи с прямой цифровой обработкой сигналов [5].

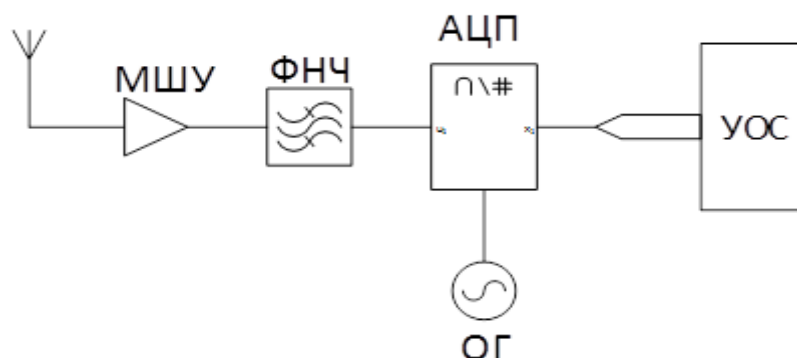


Рис. 5. Схема приёмной радиоаппаратуры с прямой цифровой обработкой сигналов.

В данной структурной схеме аналоговый высокочастотный сигнал поступает на вход малошумящего усилителя (МШУ) и затем проходит процедуру фильтрации в фильтре нижних частот (ФНЧ), после этого с помощью АЦП производится преобразование аналогового сигнала в цифровой. Вся последующая обработка и демодуляция сигнала осуществляется в цифровом виде в устройстве обработки сигналов (УОС).

Ключевыми компонентами, при реализации аппаратуры радиосвязи с использованием прямого цифрового синтеза и обработки сигналов, являются АЦП и ЦАП, так как от их параметров напрямую зависит качество передачи и приёма информации.

Как уже отмечалось выше, в настоящее время производители микросхем АЦП и ЦАП сделали большой рывок в части частотного диапазона и быстродействия данных микросхем. Параметры современных быстродействующих АЦП и ЦАП представлены в таблице 2 [14,15,16,20].

Таблица 2 - Параметры современных быстродействующих АЦП и ЦАП.

Параметры устройств	АЦП		ЦАП	
Наименование	AD9689 (Analog Dev.)	ADC32RF45 (Texas Instr.)	AD9173 (Analog Dev.)	DAC38RF82 (Texas Instr.)
Частотный диапазон, МГц	до 9000	до 4000	до 6000	до 4500
Количество каналов	2	2	2	2
Частота дискретизации, Мвыб/с	3000	3000	12600	9000
Динамический диапазон, свободный от шумов (SNR), дБ	59	61	–	–
Динамический диапазон, свободный от искажений (SFDR), дБ	78	75	75	78
Относительный уровень помех в соседнем канале (ACPR), дБ	–	–	70	68
Разрядность, бит	14	14	16	14
Интерфейс подключения	JESD204B	JESD204B	JESD204B	JESD204B
Наличие встроенных цифровых квадратурных преобразователей	да	да	да	да

Представленные в таблице АЦП и ЦАП превосходят по своим спектральным характеристикам все соответствующие аналоговые квадратурные модуляторы и демодуляторы.

Рассмотрим подробнее двухканальный ЦАП AD9173 (ф. Analog Dev.) [17]. Каждый канал ЦАП имеет в своем составе три встроенных аппаратно-реализованных параллельных цифровых каналаобразующих модулятора. В сочетании со встроенной системой цифрового преобразования частоты вверх (digital up-conversion) это позволяет проектировать аппаратуру широкополосной радиосвязи для одновременной работы в нескольких диапазонах частот с одним передающим ВЧ-трактом [18]. На рисунке 6 представлена структурная схема передающей многодиапазонной аппаратуры

широкополосной радиосвязи с использованием прямого цифрового синтеза и ЦАП AD9173 [17, 18].

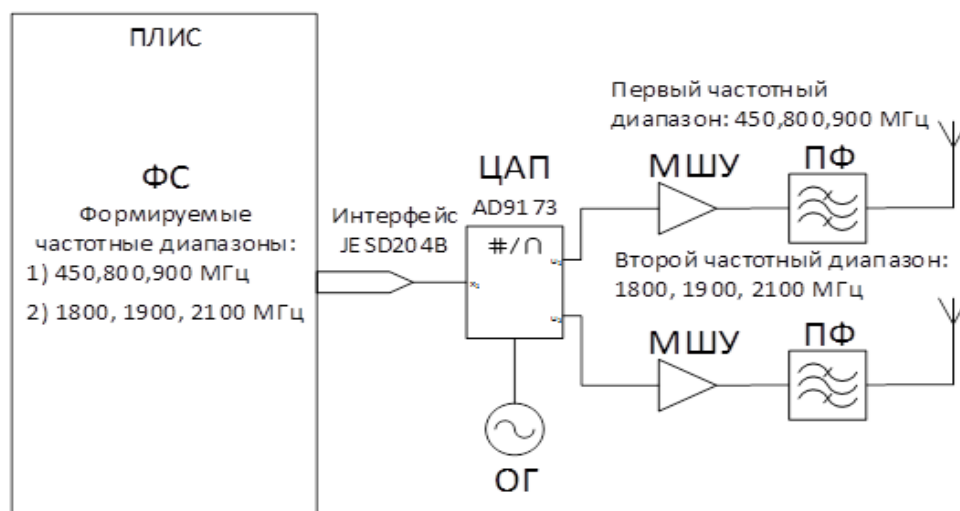


Рис. 6. Структурная схема передающей многодиапазонной аппаратуры широкополосной радиосвязи с использованием прямого цифрового синтеза и ЦАП AD9173.

Из рисунка 6 видно, что применение всего лишь одного современного двухканального ЦАП AD9173 (ф. Analog Dev.) позволяет формировать частотные диапазоны для всех современных стандартов мобильной связи: 2G, 3G, 4G [19]. В данной схеме в качестве формирователя сигналов (ФС) используется программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), позволяющая одновременно формировать все частотные диапазоны в цифровом виде. Передача цифровой информации от формирователя сигналов (ФС) до ЦАП осуществляется с помощью высокоскоростного интерфейса JESD204B, который обеспечивает скорость передачи данных до 12,5 Гбит/с по одной дифференциальной паре. Как уже отмечалось выше, каждый из двух каналов ЦАП AD9173 формируется с помощью трёх встроенных параллельных цифровых каналообразующих модуляторов. Преимущество такого подхода состоит в том, что каждый цифровой каналообразующий модулятор может иметь независимые параметры: коэффициента интерполяции, коэффициента усиления, несущей частоты, начальной фазы. Единственным ограничением для дальнейшей передачи сигналов являются возможности аналоговой части передающей аппаратуры, которая неспособна в настоящее время работать в столь широких диапазонах частот с требуемым согласованием и амплитудно-частотной характеристикой. Поэтому в структурной схеме передающей многодиапазонной аппаратуры широкополосной радиосвязи частотные диапазоны разделены на две группы (по одной на каждый канал ЦАП), каждая из которых усиливается отдельным малошумящим усилителем мощности (МШУ) и проходит процедуру полосовой фильтрации в соответствующем фильтре (ПФ).

Описанными выше преимуществами будет обладать передающая многодиапазонная аппаратура широкополосной радиосвязи с использованием прямого цифрового синтеза и построенная с помощью двухканального ЦАП DAC38RF82 (ф. Texas Instr.) [15] за исключением того, что данный ЦАП имеет в своём составе по два встроенных параллельных цифровых каналообразующих модулятора на каждый канал.

Далее рассмотрим подробнее двухканальный АЦП ADC32RF45 [16] для построения приёмной многодиапазонной аппаратуры широкополосной радиосвязи с использованием прямой цифровой обработки сигналов. Каждый из двух каналов данного АЦП имеет по

два независимых параллельных цифровых тракта квадратурной демодуляции сигналов. Кроме того, каждый канал АЦП имеет дополнительный цифровой тракт для широкополосного приёма сигналов, т.е. возможна организация обзорного приёма. На рисунке 7 представлена структурная схема приёмной многодиапазонной аппаратуры широкополосной радиосвязи с использованием прямой цифровой обработки сигналов и АЦП ADC32RF45 [16].

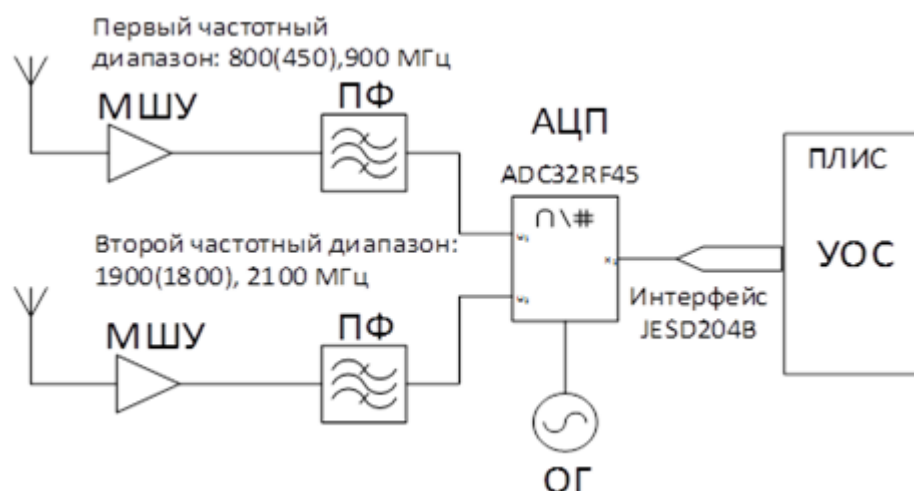


Рис. 7. Структурная схема приёмной многодиапазонной аппаратуры широкополосной радиосвязи с использованием прямой цифровой обработки сигналов и АЦП ADC32RF45.

Из рисунка 7 видно, что аналогично передающей аппаратуре в приёмной многодиапазонной аппаратуре широкополосной радиосвязи используется два аналоговых тракта приёма сигналов. Использование одного современного двухканального АЦП позволяет обрабатывать частотные диапазоны для всех современных стандартов мобильной связи: 2G, 3G, 4G. Однако параллельная одновременная работа возможна лишь в четырёх так как, каждый из двух каналов данного АЦП имеет всего по два независимых параллельных цифровых тракта квадратурной демодуляции сигналов. В указанной схеме приёма, два параллельных аналоговых сигнала, принимаемые антенной, усиливаются в усилителях мощности (МШУ) и проходят процедуру фильтрации в полосовом фильтре (ПФ). Затем аналоговые сигналы поступают на вход АЦП, где происходит цифровое преобразование и цифровая квадратурная демодуляция каждого из представленных диапазонов. После этого цифровые сигналы каждого из диапазонов передаются по интерфейсу JESD204B на устройство обработки сигналов (УОС), где происходит извлечение полезной информации сигнала и передача его потребителю.

Наличие параллельных цифровых трактов квадратурной демодуляции сигналов в составе АЦП значительно снижает вычислительную нагрузку с устройства обработки сигналов и позволяет повысить производительность системы в целом.

АЦП AD9689 (ф. Analog Dev.) [20] обладает практически схожими, с рассмотренным выше АЦП ADC32RF45, характеристиками. АЦП AD9689 также имеет в своем составе по два параллельных цифровых тракта квадратурной демодуляции сигналов на каждый канал. Однако в данном АЦП отсутствует дополнительный цифровой тракт для широкополосного приёма сигналов.

К недостаткам представленного способа построения приёмной многодиапазонной аппаратуры широкополосной радиосвязи с использованием прямой цифровой обработки сигналов и быстродействующих АЦП можно отнести высокую стоимость самих АЦП.

Выводы

В ходе анализа способов построения аппаратуры широкополосной радиосвязи было установлено, что способ, основанный на непосредственной модуляции и демодуляции сигнала на высоких частотах, не может в полной мере соответствовать современным стандартам связи, особенно в части многодиапазонных систем. Это связано с тем, что используемые электронные компоненты, а именно квадратурные модуляторы и демодуляторы обладают низкими спектральными характеристиками. Однако данные компоненты имеют довольно низкую стоимость, что делает их привлекательными для малопроизводительных систем с низкими требованиями к спектральному составу сигналов.

Использование способа построения аппаратуры широкополосной радиосвязи на основе прямого цифрового синтеза и обработки сигналов позволяет в значительной степени облегчить задачи обработки сигналов. А использование современных АЦП и ЦАП позволяет не только создавать аппаратуру с высокими спектральными характеристиками, но снижать вычислительные ресурсы устройств формирования и обработки сигналов. Однако высокая цена современных АЦП не способствует широкому распространению данного способа в части приёмной аппаратуры.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) При построении многодиапазонных систем с высокими спектральными характеристиками, например, аппаратуры широкополосной радиосвязи для стационарных базовых станций, целесообразнее использовать предлагаемый способ на основе прямого цифрового синтеза и обработки сигналов и быстродействующих АЦП и ЦАП.
- 2) При построении однодиапазонных систем с низкими требованиями к спектральному составу сигналов, например, аппаратуры широкополосной радиосвязи для мобильных или носимых станций, можно использовать способ, основанный на непосредственной модуляции и демодуляции сигнала на высоких частотах.

Список литературы

1. Ericsson Mobility Report // Ericsson URL: <https://www.ericsson.com/assets/local/news/2016/03/ericsson-mobility-report-nov-2015.pdf> (дата обращения: 12.11.2018 г.).
2. Kenington P. B. RF and Baseband Technique for Software Defined Radio (Artech House Mobile Communications). Norwood: Artech House, 2005. 340 p. ISBN 9781580537933; 978-1580537933.
3. Бобров Н. В. Радиоприёмные устройства. 2-е изд., доп. М.: Энергия, 1976. 367 с.
4. Голуб В. Квадратурные модуляторы и демодуляторы в системах радиосвязи // Электроника: наука, технология, бизнес. 2003. № 3 (45). С. 28–32.
5. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов. М.: ДМК Пресс. 2010. 384 с. ISBN 978-5-94074-493-1.
6. Luzzatto A., Shirazi G. Wireless transceiver design: mastering the design of modern wireless equipment and systems. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 2007. 265 p. ISBN 9780470060803; 0470060808.
7. Cushing R. Single-Sideband Upconversion of Quadrature DDS Signals to the 800-to-2500-MHz Band // Analog Dialogue. 2000. Vol. 34, no. 3. P. 1–5.
8. TRF370417 50MHz to 6.0 GHz Quadrature Modulator, 1.7V common-mode voltage // Texas Instruments. URL: <http://www.ti.com/product/TRF370417> (дата обращения: 12.11.2018 г.).
9. Bhattacharya S., Srinivasan G., Cherubal S. [et al.]. Test time reduction for ACPR measurement of wireless transceivers using periodic bit-stream sequences // Proceedings. DELTA 2004. Second IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications, January 28–30, 2004. Perth, 2004. DOI: 10.1109/DELTA.2004.10015.

10. 3GPP TS 45.004, "Radio Access Networks; Modulation," Release 7, v7.2.0, 2008-02. URL: <https://ch.mathworks.com/help/comm/ug/error-vector-magnitude-evm.html> (дата обращения: 12.11.2018 г.).
11. Specification #: 25.912 // 3GPP Portal. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=1341> (дата обращения: 12.11.2018 г.).
12. Зянг Й. Баланс квадратурных составляющих и подавления зеркального канала в беспроводных передатчиках // Беспроводные технологии. 2011. № 1. С. 58–63.
13. Гольцова М. Быстродействующие широкополосные ЦАП. Борьба на рынке коммуникационных систем усиливается // Электроника: наука, техника, бизнес. 2001. № 2 (32). С. 24–28.
14. AD9173 // Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9173.pdf> (дата обращения: 15.10.2018).
15. DAC38RF82, DAC38RF89 // Texas Instruments. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac38rf82.pdf> (дата обращения 12.11.2018)
16. ADC32RF45 // Texas Instruments. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ad32rf45.pdf> (дата обращения: 15.10.2018).
17. AD9173 // Analog Devices <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9173.pdf> (дата обращения: 12.11.2018 г.).
18. RF Converters: A Technology That Is Enabling Wideband Radios <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/a24834-rf-converters-a-technology-that-is-enabling-wideband-radios.pdf> (дата обращения: 12.11.2018 г.).
19. New RF DAC Broadens Software-Defined Radio Horizon // Analog Devices URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-50/number-3/articles/new-rf-dac-broadens-sdr-horizon.pdf> (дата обращения: 12.11.2018).
20. AD9689 // Analog Devices URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9689.pdf> (дата обращения: 12.11.2018).

References

1. Ericsson Mobility Report // Ericsson URL: <https://www.ericsson.com/assets/local/news/2016/03/ericsson-mobility-report-nov-2015.pdf> (the date of the appeal: 12.11.2018).
2. Kenington P. B. RF and Baseband Technique for Software Defined Radio (Artech House Mobile Communications). Norwood: Artech House, 2005. 340 p. ISBN 9781580537933; 978-1580537933.
3. Bobrov N.V. Radio receivers. 2nd ed., Ext. M.: Energy, 1976. 367 p. (In Russian).
4. Golub V. Quadrature modulators and demodulators in radio communication systems // Electronics: science, technology, business. 2003. № 3 (45). Pp. 28–32 (In Russian).
5. Dyakonov V.P. Generation and Signal Generators. M.: DMK Press. 2010. 384 p. ISBN 978-5-94074-493-1 (In Russian).
6. Luzzatto A., Shirazi G. Wireless transceiver design: mastering the design of modern wireless equipment and systems. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 2007. 265 p. ISBN 9780470060803; 0470060808.
7. Cushing R. Single-Sideband Upconversion of Quadrature DDS Signals to the 800-to-2500-MHz Band // Analog Dialogue. 2000. Vol. 34, no. 3. P. 1–5.
8. TRF370417 50MHz to 6.0 GHz Quadrature Modulator, 1.7V common-mode voltage // Texas Instruments. URL: <http://www.ti.com/product/TRF370417> (the date of the appeal: 12.11.2018).
9. Bhattacharya S., Srinivasan G., Cherubal S. [et al.]. Test time reduction for ACPR measurement of wireless transceivers using periodic bit-stream sequences // Proceedings.

DELTA 2004. Second IEEE International Workshop on Electronic Design, Test and Applications, January 28–30, 2004. Perth, 2004. DOI: 10.1109/DELTA.2004.10015.

10. 3GPP TS 45.004, “Radio Access Networks; Modulation,” Release 7, v7.2.0, 2008-02. URL: <https://ch.mathworks.com/help/comm/ug/error-vector-magnitude-evm.html> (дата обращения: 12.11.2018 г.).

11. Specification #: 25.912 // 3GPP Portal. URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=1341> (the date of the appeal: 12.11.2018).

12. Zyang Y. Balance of quadrature components and the suppression of the mirror channel in wireless transmitters // Wireless technologies. 2011. No. 1. P. 58–63 (In Russian).

13. Goltsova M. High-speed broadband DAC. The struggle in the market of communication systems is increasing // Electronics: science, technology, business. 2001. No. 2 (32). P. 24–28 (In Russian).

14. AD9173 // Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad9173.pdf> (the date of the appeal: 12.11.2018).

15. DAC38RF82, DAC38RF89 // Texas Instruments. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/dac38rf82.pdf> (the date of the appeal: 12.11.2018)

16. ADC32RF45 // Texas Instruments. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/adc32rf45.pdf> (the date of the appeal: 12.11.2018).

17. AD9173 // Analog Devices <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9173.pdf> (the date of the appeal: 12.11.2018).

18. RF Converters: A Technology That Is Enabling Wideband Radios <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/a24834-rf-converters-a-technology-that-is-enabling-wideband-radios.pdf> (the date of the appeal: 12.11.2018).

19. New RF DAC Broadens Software-Defined Radio Horizon // Analog Devices URL: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-50/number-3/articles/new-rf-dac-broadens-sdr-horizon.pdf> (the date of the appeal: 12.11.2018).

20. AD9689 // Analog Devices URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9689.pdf> (the date of the appeal: 12.11.2018).