

РАЗРАБОТКА ПЕРЕДАТЧИКА РАДИОСТАНЦИИ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ОДНОПОЛОСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Александрова А.В.¹, студент гр.241201

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹
г. Минск, Республика Беларусь

Титович Н. А. – к. т. н., доцент кафедры ИРТ БГУИР

Аннотация. В работе рассматривается проектирование маломощного передатчика декаметрового диапазона (3–30 МГц) для передачи цифровых данных со скоростью 2048 бит/с. Обосновано использование однополосной модуляции (ОМ), обеспечивающей энергетический выигрыш до 11 дБ и двукратное сокращение полосы частот. Предложен цифровой метод формирования ОМ-сигнала на базе преобразования Гильберта и квадратурного модулятора. Описана аппаратная реализация на современных компонентах: микроконтроллере STM32L476VG и синтезаторе LMX2615-SP.

Ключевые слова. Передатчик, декаметровый диапазон, однополосная модуляция, квадратурный модулятор, преобразование Гильберта, цифровая обработка сигналов, синтезатор частот.

Введение

Радиосвязь в декаметровом (коротковолновом) диапазоне частот (3–30 МГц) на протяжении десятилетий остается одним из наиболее востребованных и надежных способов передачи информации на дальние расстояния. Благодаря способности радиоволн данного диапазона к многократному отражению от ионосферы Земли и земной поверхности, становится возможной организация глобальных линий связи без использования дорогостоящей спутниковой инфраструктуры или наземных ретрансляторов. Это предопределяет стратегическую важность КВ-диапазона для обеспечения связи в труднодоступных регионах, в морской и авиационной навигации, а также в системах экстренного оповещения.

Однако использование данного диапазона сопряжено с рядом существенных трудностей: ограниченностью частотного ресурса, высоким уровнем атмосферных и промышленных помех, а также сложной помеховой обстановкой из-за высокой плотности работающих станций. В этих условиях критически важным становится выбор вида модуляции, обеспечивающего максимальную спектральную и энергетическую эффективность.

Наиболее рациональным решением данной задачи является использование однополосной модуляции (ОМ). В отличие от традиционной амплитудной модуляции (АМ), при использовании ОМ в эфир излучается только одна боковая полоса, несущая всю полезную информацию, в то время как несущая частота и вторая боковая полоса подавляются. Это дает следующие преимущества:

- Спектральная эффективность: занимаемая полоса частот сокращается в два раза, что позволяет увеличить число каналов в выделенном диапазоне.
- Энергетический выигрыш: подавление неинформативной несущей позволяет перераспределить всю мощность передатчика в полезный сигнал, обеспечивая выигрыш в 9–11 дБ.
- Помехоустойчивость: сужение полосы приема в оконечном устройстве пропорционально снижает уровень принимаемых шумов. [4]

Современный этап развития радиосвязи характеризуется переходом к полностью цифровым методам формирования сигналов. Традиционные аналоговые методы формирования ОМ (фильтровый и фазокомпенсационный) обладают рядом недостатков: сложностью настройки, температурной нестабильностью и громоздкостью прецизионных кварцевых фильтров.

Целью данной работы является проектирование передатчика КВ-диапазона мощностью 10 Вт, реализующего передачу цифровых данных со скоростью 2048 бит/с. В основу разработки положен метод цифрового синтеза аналитического сигнала с использованием преобразования Гильберта на базе высокопроизводительного микроконтроллера с ядром Cortex-M4. Такой подход позволяет реализовать программно-определяемую радиосистему (SDR), обеспечивающую высокую точность подавления нерабочей боковой полосы и гибкость адаптации под различные протоколы передачи данных.

1. Схемы построения современных синтезаторов частот

Синтезатор частот (СЧ) является одним из наиболее критических узлов современных приемо-передающих систем, определяющим такие параметры, как чувствительность приемника и качество обработки сигналов. К современным устройствам предъявляется ряд жестких требований:

- Высокая стабильность частоты и минимальный фазовый шум, существенно ограничивающие чувствительность приемных систем.
- Широкая полоса частот и высокое разрешение (менее 1 Гц), что критично для измерительной аппаратуры.
- Высокая скорость перестройки, необходимая для реализации режима псевдослучайной перестройки частоты (ППРЧ) в современных цифровых форматах связи.
- Низкий уровень негармонических спектральных составляющих, которые могут ограничивать способность системы выделять и обрабатывать принимаемый сигнал. [2]

При построении аналоговых синтезаторов частот используется метод смешения базовых частот опорных генераторов (ОГ) в преобразователях (ПР) с их последующей фильтрацией полосовыми фильтрами (ПФ). Основной особенностью считается то, что генераторы базовых частот (ГБЧ) строятся на низкочастотных резонаторах (кварцевых или ПАВ) либо высокочастотных диэлектрических и керамических резонаторах. Главным преимуществом является высокая скорость переключения в микро- или наносекундном диапазоне и крайне малый уровень собственных шумов. Основной недостаток этого метода — ограниченный диапазон частот и низкое разрешение. Увеличение числа ГБЧ и смесительных каскадов значительно усложняет схему.

Схемы с ФАПЧ являются основными при построении интегральных СЧ благодаря минимальному уровню фазовых шумов в установившемся режиме. Типовая однопетлевая схема включает в себя перестраиваемый генератор (ПГ), делитель частоты с программируемым коэффициентом деления (ДПКД), фазовый детектор (ФД) и фильтр нижних частот (ФНЧ).

Фазовый шум синтезатора в пределах полосы пропускания фильтра ФАПЧ определяется формулой:

$$\theta = \theta_{\text{фд}} + 20 \log M, \quad (1)$$

где $\theta_{\text{фд}}$ — пересчитанный ко входу ФД суммарный уровень фазовых шумов ОГ, ДФКД, ФД и ФНЧ;
 M — коэффициент деления.

Для получения высокой разрешающей способности требуется большой коэффициент деления M . Например, для получения сигнала 10 ГГц с разрешением 1 МГц значение M должно быть равно 10 000, что увеличивает фазовый шум на 80 дБ. Синтезаторы прямого цифрового синтеза (DDS) позволяют значительно повысить скорость перестройки и разрешение по частоте (ниже 1 Гц).

Принцип работы: На основе фазового аккумулятора создается цифровое представление сигнала, которое затем преобразуется в аналоговую форму (синусоидальную или любую другую) посредством цифро-аналогового преобразователя (ЦАП).

Главными проблемами являются ограниченный частотный диапазон (верхняя граница не может превышать половины тактовой частоты ОГ f_0 и высокое содержание нежелательных спектральных составляющих (спулов) из-за ошибок преобразования в ЦАП. Практическая верхняя граница диапазона DDS обычно находится в районе нескольких сотен МГц.

Основываясь на результатах проведенного анализа, выбор технического решения для проекта был сделан в пользу использования комбинированных схем, объединяющих достоинства ФАПЧ и DDS. Исследования показывают, что улучшить параметры СЧ можно с помощью комбинированных схем, объединяющих достоинства ФАПЧ и DDS.

В проектируемом передатчике в качестве основного узла синтеза выбран высокопроизводительный синтезатор LMX2615-SP с интегрированной системой ФАПЧ и ГУН (VCO). Данная микросхема обеспечивает генерацию спектрально чистого сигнала в диапазоне до 15 ГГц с экстремально низким фазовым шумом (47 фс на частоте 9 ГГц). Для обеспечения требуемой по ТЗ относительной нестабильности частоты $5 \cdot 10^{-7}$ используется прецизионный опорный MEMS-генератор SiT5503 со стабильностью $\pm 0,1$ ppm. Применение такого тандема позволяет полностью удовлетворить требования по точности несущей частоты в диапазоне 3–30 МГц.

2. Цифровой метод формирования однополосного сигнала

Выбор метода формирования однополосного сигнала является определяющим фактором при проектировании тракта передатчика. Исторически развитие систем ОМ прошло путь от громоздких многокаскадных аналоговых схем до компактных систем цифровой обработки сигналов (ЦОС). [3]

Теоретически ОМ-сигнал можно получить из обычного АМ-сигнала путем подавления несущей и одной из боковых полос с помощью высокоизбирательного фильтра. Однако на практике прямой фильтровый метод на рабочих частотах радиосвязи крайне трудно реализуем. Для подавления ненужной части спектра (например, нижней боковой полосы при частоте несущей 1 МГц) требуется фильтр с расчетной кривизной АЧХ $S = 0,01$. Такая крутизна практически недостижима для аналоговых элементов, включая кварцевые и электромеханические фильтры, непосредственно на высокой несущей частоте.

В 30–40-е годы XX века для обхода этой проблемы применяли метод многократной балансной модуляции, где сигнал переносился на промежуточную частоту (100–500 кГц), фильтровался и снова переносился вверх. Это усложняло схему, повышало стоимость и уровень комбинационных помех.

В современной аппаратуре формирование ОМ-сигнала осуществляется программно на базе микросхем ЦОС с использованием аппарата преобразования Гильберта. В основе метода лежит представление реального сигнала в виде комплексной огибающей (аналитического сигнала).

Любой дискретный сигнал может быть представлен в виде набора комплексных чисел:

$$S[n] = I[n] + jQ[n], \quad (2)$$

где $I[n]$ — синфазная составляющая (действительная часть);
 $Q[n]$ — квадратурная составляющая (мнимая часть).

Визуально такой сигнал можно представить как вращающийся вектор в трехмерном пространстве (оси x , y и время z), образующий спираль. В каждый момент времени, задавая амплитуду косинуса (I) и синуса (Q), можно получить любые мгновенные значения амплитуды и фазы.

Для формирования ОМ-сигнала необходимо подготовить комплексную огибающую, в спектре которой уже отсутствует одна из боковых полос. Это достигается путем формирования ортогонального дополнения сигнала через фильтр Гильберта. Фильтр Гильберта представляет собой идеальный фазовращатель на 90° . Его частотная характеристика $H_{j\omega}$ сдвигает все положительные частоты на -90° , а отрицательные — на $+90^\circ$.

Итоговый радиосигнал формируется в квадратурном модуляторе по формуле:

$$s(t) = s_m(t) \cdot \cos(\omega_0 t) \pm S_{орт}(t) \cdot \sin(\omega_0 t), \quad (3)$$

где $S_{орт}(t)$ — сигнал, прошедший преобразование Гильберта.

При подаче составляющей на сумматор можно программно выбирать верхнюю или нижнюю боковую полосу.

Для минимизации вычислительной сложности в проектируемом передатчике используется алгоритм на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ):

- 1 Вычисление ДПФ от исходного сигнала $x[n]$ для получения спектра $X_{j\omega}$
- 2 Обнуление элементов с отрицательными частотами.
- 3 Усиление в 2 раза элементов с положительными частотами.
- 4 Обратное ДПФ, результатом которого является искомым аналитический сигнал $s[n]$.

Этот метод позволяет отказаться от громоздких фильтров и реализовать формирование ОМ-сигнала полностью внутри микроконтроллера STM32L476VG, обладающего аппаратным модулем вычислений с плавающей запятой (FPU). [1]

3. Разработка структурной и функциональной схем передатчика

Проектируемое устройство представляет собой современный маломощный передатчик коротковолнового диапазона, построенный по архитектуре прямого преобразования (Direct Conversion). Данный подход позволяет исключить промежуточные каскады преобразования частоты, что значительно упрощает схему, снижает уровень комбинационных помех и позволяет реализовать основные операции по формированию сигнала методами цифровой обработки (SDR-технология).

На основе проведенного анализа методов формирования однополосного сигнала и заданных технических характеристик была разработана структурная схема передатчика и представлена на рисунке 1.

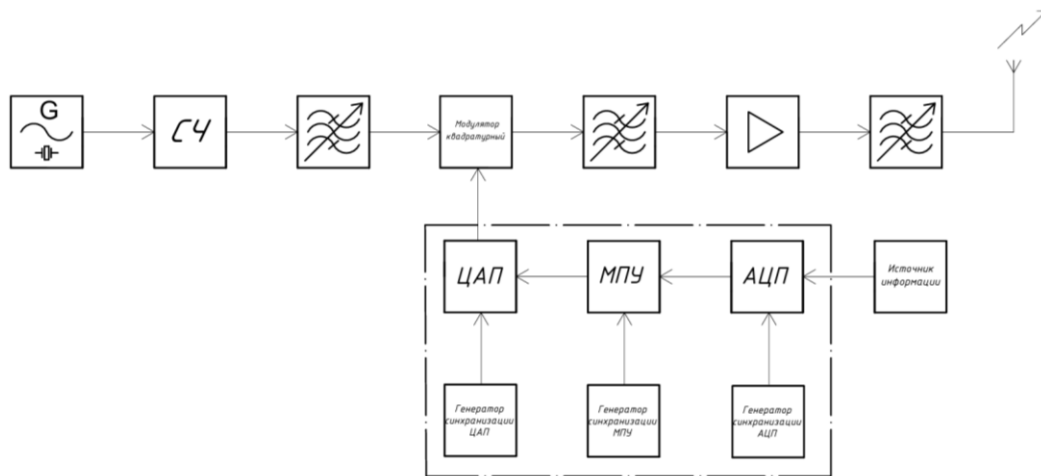


Рисунок 1 – Структурная схема передатчика

На основании проведенного технического анализа и требований задания была разработана структурная схема проектируемого передатчика. В основу системы положен высокостабильный кварцевый опорный генератор, который задает базовую частоту и напрямую определяет точность несущей, а также уровень фазового шума в выходном сигнале. На базе этого сигнала синтезатор частоты, работающий по принципу ФАПЧ с дробным делителем, формирует рабочую несущую путем операций умножения, деления и сдвига. Для обеспечения чистоты спектра на вход модулятора сигнал подается через полосовой фильтр, который эффективно устраняет побочные частоты смещения, гармоники и паразитные излучения. Процесс формирования информационного сигнала начинается в цифровой ветви, где источником модулирующего сигнала выступает микрофон, преобразующий звуковые колебания в диапазоне 300–3000 Гц в электрический сигнал. Этот сигнал оцифровывается аналого-цифровым преобразователем с частотой дискретизации до 48 кГц и разрядностью до 16 бит, что позволяет перевести голос в цифровой поток для дальнейшей обработки. Центральным звеном тракта является микропроцессорное устройство, выполняющее сложную цифровую фильтрацию, подавление шумов и формирование SSB-сигнала методом сдвига спектра с генерацией синфазной (I) и квадратурной (Q) компонент. Подготовленные цифровые потоки прецизионно восстанавливаются цифро-аналоговым преобразователем в аналоговые сигналы низкой частоты для подачи на квадратурные входы модулятора. Главным узлом формирования модулированного колебания является квадратурный модулятор, в котором два балансных смесителя и сумматор объединяют несущую с I- и Q-

сигналами, сдвинутыми на 90° , формируя однополосный сигнал с глубоким подавлением нерабочей боковой полосы. Последующий полосовой фильтр производит окончательную очистку спектра от продуктов перемодуляции и внеполосных составляющих, возникших в процессе модуляции. Далее усилитель поднимает мощность сигнала до уровня, необходимого для работы оконечного каскада, а завершающий тракт низкочастотный фильтр подавляет высшие гармоники, обеспечивая соответствие нормам по внеполосным излучениям перед подачей сигнала в антенну. Стабильность работы всей цифровой части гарантируется генераторами синхронизации, которые обеспечивают синфазность оцифровки и восстановления сигнала, исключая появление джиттера.

Для детальной реализации логики взаимодействия узлов была разработана функциональная схема, отражающая конкретные микросхемы и уровни сигналов в тракте.

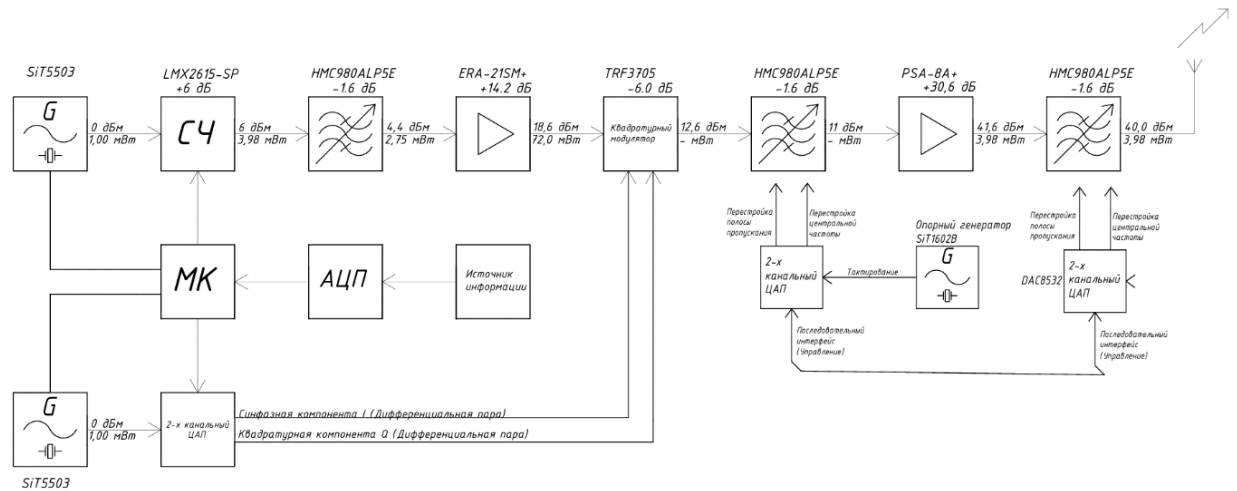


Рисунок 2 – Функциональная схема устройства

Для детального описания логики работы устройства и наглядного представления последовательности взаимодействия его частей была разработана функциональная схема, представленная на рисунке 2. Процесс формирования радиосигнала начинается с генератора SiT5503 (ХО/ТСХО), который формирует стабильный опорный сигнал с частотой около 100 МГц и уровнем 0 дБм, являющийся начальной точкой для дальнейшего синтеза через петлю ФАПЧ. Стабильность данного узла критична, так как от неё напрямую зависят фазовый шум, точность частоты и итоговое качество выходного сигнала. Правильную передачу сигнала между генератором и последующими каскадами обеспечивает согласующее устройство, реализующее волновое сопротивление 50 Ом для исключения отражений, потерь мощности и возникновения нежелательных искажений. Основной синтез рабочей частоты осуществляется микросхемой LMX2615-SP с системой ФАПЧ (PLL), которая принимает опорный сигнал, программно перестраивает частоту и повышает уровень сигнала на 6 дБ. Далее сигнал проходит через цифровой аттенуатор HMC980ALP5E, работающий в фиксированной точке ослабления 1,6 дБ для точной калибровки системы и защиты последующих узлов от перегрузки. Существенный подъем уровня сигнала после прохождения пассивных цепей обеспечивает широкополосный малощумящий усилитель ERA-2SM+, увеличивающий мощность примерно в 26 раз (усиление 14,2 дБ) при сохранении стабильной работы в широком диапазоне частот. На этапе модуляции ВЧ-несущая поступает на квадратурный модулятор, где на неё накладывается информационный сигнал через каналы I (in-phase) и Q (quadrature) со сдвигом на 90° , что позволяет фактически превратить несущую в информационный сигнал. Управление процессом модуляции осуществляется посредством цифро-аналоговых преобразователей, формирующих аналоговые сигналы из цифровых данных для модулятора TRF3705. После модуляции сигнал регулируется вторым аттенуатором для поддержания линейности тракта и предотвращения искажений при возникновении пиков в модулированном сигнале. Финальное усиление перед передачей в антенну выполняет мощный ВЧ-усилитель PSA-8A+, значительно увеличивающий мощность сигнала и подготавливающий его к передаче. Вся работа системы координируется микроконтроллером, который управляет синтезатором, аттенуаторами и преобразователями данных, задавая частоту и режимы работы всей системы. Для контроля параметров, таких как температура или уровень сигнала, используется АЦП, переводящий аналоговые данные обратной связи в цифровую форму для обработки процессором. Общую синхронизацию цифровых блоков и узлов синтеза обеспечивает дополнительный генератор SiT1602B, гарантирующий стабильную работу всего приемопередающего тракта. Итоговый алгоритм функционирования сводится к последовательной генерации стабильной опоры, синтезу рабочей частоты, усилению и последующему наложению модуляции с финальным выводом сигнала на антенну под полным программным управлением.

Заключение

В результате выполнения данной работы был спроектирован передатчик радиостанции декаметрового диапазона (3–30 МГц), обеспечивающий передачу цифровой информации со скоростью 2048 бит/с при выходной мощности 10 Вт. Выбор однополосной модуляции в качестве основного метода передачи обоснован её высокой спектральной и энергетической эффективностью, что позволяет вдвое сократить занимаемую полосу частот и

получить выигрыш в 9–11 дБ за счет подавления несущей и второй боковой полосы. Применение цифрового метода формирования сигнала на базе преобразования Гильберта и концепции аналитического сигнала позволило отказаться от использования громоздких аналоговых кварцевых фильтров, обеспечив высокую точность подавления нерабочей боковой полосы программными средствами. Технические требования по относительной нестабильности частоты на уровне $5 \cdot 10^{-7}$ были успешно реализованы благодаря использованию прецизионного опорного MEMS-генератора SiT5503 со стабильностью $\pm 0,1$ ppm. Основной вычислительный узел на базе микроконтроллера STM32L476VG с ядром Cortex-M4 и модулем FPU обеспечивает необходимую производительность для цифровой обработки сигналов в реальном времени при сохранении низкого энергопотребления. Высокая спектральная чистота выходного сигнала и низкий уровень фазовых шумов достигаются за счет применения широкополосного синтезатора LMX2615-SP и квадратурного модулятора TRF3705, обеспечивающего подавление несущей частоты более чем на 40 дБс. Разработанная архитектура передатчика обладает значительным потенциалом для применения в современных системах связи, радиолокации и измерительной технике. Дальнейшее развитие проекта может быть направлено на детальный анализ шумового вклада отдельных функциональных блоков и оптимизацию схемы путём внедрения гибридных методов синтеза.

Список использованных источников:

1. Сорока, Н. И. Телемеханика. Модуляция и кодирование информации : пособие / Н. И. Сорока, Г. А. Кривинченко. – Минск : БГУИР, 2020. – 154 с.
2. Иванюшкина, Р. Ю. Радиопередающие устройства : учебник для вузов / Р. Ю. Иванюшкина [и др.]. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2019. – 564 с.
3. Верзунов, М. В. Однополосная модуляция / М. В. Верзунов, И. В. Лобанов, А. М. Семенов. – Москва : Связьиздат, 1962. – 298 с.
4. Анисимов, А. Г. Однополосная радиосвязь / А. Г. Анисимов. – Москва : Воениздат, 1961. – 184 с.

UDC 621.396.62

DIGITAL HF TRANSMITTER WITH SINGLE-SIDEBAND MODULATION BASED ON THE HILBERT TRANSFORM

Aleksandova A. V.¹

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Titovich N. A. – PhD, Associate Professor of the IRT department, BSUIR

Annotation. The design of a low-power digital HF transmitter operating in the 3–30 MHz frequency range is presented. The advantages of using single-sideband (SSB) modulation in terms of spectral efficiency and energy gain are highlighted. The implementation of digital signal processing (DSP) for SSB synthesis using the Hilbert transform on a high-performance STM32L476VG microcontroller is investigated. The hardware architecture, including a high-stability MEMS reference oscillator, a wideband PLL synthesizer, and a quadrature modulator, is described. The developed device provides reliable digital data transmission at 2048 bps with a 10W output power.

Keywords. HF transmitter, single-sideband modulation, SSB, Hilbert transform, digital signal processing, STM32L476VG, LMX2615-SP, TRF3705, frequency synthesis, spectral efficiency.