

Полунатурное моделирование цифрового канала передачи данных в ультразвуковом диапазоне длин волн

Гусев С.Н.*, Миклин Д.В.*, Мороз А.В.*, Сахно И.В.*, Шерстюк А.В.*

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского,
ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия*

**e-mail: vka@mail.ru*

Статья поступила 24 июля 2020

Аннотация

Представлено описание результатов разработки лабораторной установки для полунатурного моделирования канала передачи данных в ультразвуковом диапазоне длин волн. Приводится структурная схема, описание цифрового приемопередающего тракта с программной обработкой сигналов. Представлены технические характеристики установки и основы методики проведения моделирования и оценки характеристик цифровых каналов передачи данных в составе систем дистанционного зондирования различного назначения

Ключевые слова: полунатурное моделирование, ультразвуковой канал, программный прием сигналов, цифровой квадратурный приемник, частотная и фазовая автоподстройка частоты, вероятность битовой ошибки.

Введение

Анализ публикаций вышедших по результатам летных испытаний малого космического аппарата «Кондор - Э» [1], показывает, что при разработке космических

систем дистанционного зондирования земли на базе радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА) чрезвычайно важным элементом является отработка в ходе наземных испытаний сквозного тракта РСА: бортовой и наземной аппаратуры формирования радиолокационных изображений (РЛИ). В работах [1-3], в том числе, делается вывод о том, что в ходе наземных испытаний должны быть проработаны все возможные варианты, связанные с особенностями прохождения радиолокационной информации по сквозному тракту от КРСА до наземного пункта обработки информации и не должно быть оставлено открытых вопросов в процедурах программной обработки радиолограмм на всех этапах формирования РЛИ. Под сквозным трактом КРСА будем понимать совокупность аппаратных и программных средств в составе системы ДЗЗ, непосредственно задействованных в процессах получения, регистрации, передачи и обработки радиолокационной информации с целью формирования на выходе РЛИ с заданными метрологическими характеристиками (геометрическими и радиометрическими).

В этой связи, для повышения эффективности работ по проектированию радиолокационных систем и решения указанных выше задач, широко используются различные методы моделирования: математическое, полунатурное и масштабное физическое. В ряде работ [2, 3], авторы рассматривают различные аспекты создания математических моделей информационного (сквозного) тракта РСА, которые достаточно полно описывают как внутреннюю структуру КРСА, так и процессы на этапе формирования РЛИ. Для описания внешней среды (объекты съемки, влияние среды распространения и шумов в тракте приема и т.д.) целесообразно использовать полунатурные или масштабные физические модели (электродинамические и

ультразвуковые) [4, 5, 18-21]. Например, в работах [6-13] представлены лабораторные установки для моделирования режимов работы РСА и цифровой системы обработки траекторного сигнала. Опыт показывает, что именно моделирование позволяет снижать риски невыполнения требований тактико-технического задания в ходе проектирования КРСА, а также риски последующего невыполнения сроков НИОКР и минимизирует связанные с этим соответствующие финансовые и временные затраты на создание системы. В работе [14] показано, что программно-алгоритмическое обеспечение, отработанное на ультразвуковом локационном комплексе, позволило получить локационное изображение с экспериментальной РСА в кратчайшие сроки в последующей натурной отработке.

Одним из ключевых элементов сквозного тракта КРСА является высокоскоростная линия передачи радиолокационной информации на пункт приема и обработки. В настоящее время внешнее моделирование линии передачи данных от РСА до пункта обработки информации выполняется, в основном, с использованием математических моделей с присущими данному виду моделирования недостатками в виде вводимых ограничений и допущений, связанных с оценкой влияния среды распространения, с оценкой влияния шумов тракта, влияния особенностей функционирования отдельных блоков приемника. Данные обстоятельства послужили основанием для разработки макета для проведения полунатурного моделирования цифровой системы передачи траекторного сигнала на основе цифровой ультразвуковой системой передачи данных (УСПД).

Под полунатурным моделированием понимаем исследование системы на моделирующей установке с включением в состав модели элементов реальной

аппаратуры (в данном случае это программно-алгоритмическое обеспечение цифрового приемо-передатчика).

Под цифровой ультразвуковой системой передачи данных (УСПД) далее будем понимать систему передачи, в которой для передачи цифровых сигналов данных на расстояние, используется ультразвуковой канал.

Целью статьи является представление обоснование и методики полунатурного моделирования и структуры лабораторной установки бинарной цифровой ультразвуковой системы передачи данных для последующего построения лабораторного макета сквозного тракта КРСА, осуществляющего совместно передачу информации в канале с помехами и построение радиолокационного изображения, в составе: макет бортовой аппаратуры; УСПД; макет цифровой системы обработки (ЦСО).

Постановка задачи и основные тактико-технические характеристики установки полунатурного моделирования ультразвуковой системы передачи данных

Для разработки макета УСПД, последовательно реализованы следующие мероприятия:

– разработана структурная схема и программно реализованы основные элементы УСПД с учетом особенностей функционирования в радио- и ультразвуковом (УЗ) диапазоне;

- реализована возможность и учтен при разработке программных модулей, возникающий при движении передатчика/приемника, эффект Доплера;
- разработано программно-алгоритмическое обеспечение УСПД, в виде набора функционально связанных подпрограмм;
- реализована возможность получать количественные оценки значений ошибок, возникающих в канале передачи данных в различных условиях функционирования;
- реализована возможность постановки помех и управления энергетическим потенциалом моделируемой линии связи.

Схема лабораторной установки представлена на рис. 1.

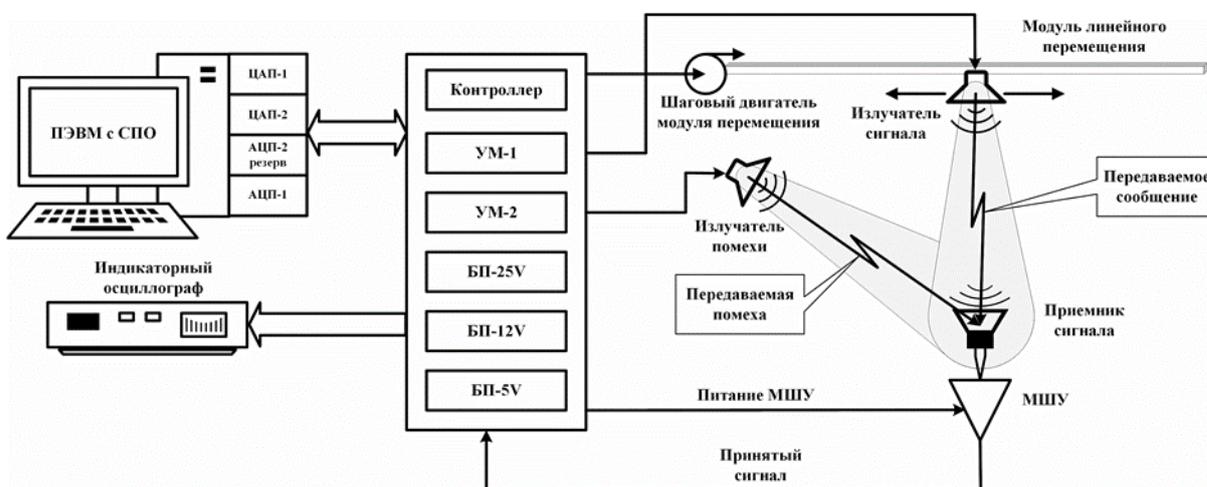


Рис. 1. Схема лабораторной установки для полунатурного моделирования УСПД

Оборудование лабораторного макета включает следующие компоненты:

- управляющая ПЭВМ со специальным программным обеспечением формирования, оцифровки и обработки сигналов;
- контроллер управления перемещением блока излучателей/приемника;

- осциллограф – отображения излучаемых и принимаемых сигналов;
- усилители (УМ) и ультразвуковой излучатель (передатчик);
- малошумящий усилитель (МШУ) и ультразвуковой приемник.

В результате разработки реализованы следующие тактико-технические характеристики УСПД:

- несущая частота – 40 кГц;
- ширина спектра – до 20 кГц;
- вид сигнала – ПШС (ФМ-2);
- вид кодовой последовательности – М-последовательность;
- длительность чипа (битового символа) – 0,001 с;
- длительность информационного пакета – 1,264 с;
- скорость передачи данных до 1 кбит/с;
- пропускная способность канала при отношении сигнал/шум

$S/N=6 \sim 2,8$ кбит/с, при $S/N=20 \sim 4,3$ кбит/с;

- диапазон изменения значений S/N в УСПД – 0 – 30 дБ;
- предельная дальность работы УСПД (в воздушной среде) – до 10 метров;
- способ формирования и обработки сигнала – программный;
- способы захвата и удержания несущей частоты и фазы реализованы на основе

частотной и фазовой автоподстройки частоты (ЧАПЧ, ФАПЧ) (программно).

Реализованные в ходе разработки тактико-технические характеристики позволяют проводить исследования характеристик установки в т.ч. оценку качества передачи информационных пакетов в различных условиях применения, отрабатывать алгоритмическое обеспечение программного тракта УСПД, исследовать влияние

различного вида помех на характеристики установки, а также (в перспективе) исследовать эффективность методов подавления помех различной структуры.

Информационный пакет, сформированный специальным программным обеспечением ПЭВМ адаптирован под структуру данных, формируемых макетом РСА, что позволяет передавать построчно локационные голограммы, для последующего синтеза на их основе локационных изображений [13]. Таким образом, здесь и далее под информационным пакетом понимается определенным образом, сформированный пакет данных, передаваемых УСПД.

Основы методики моделирования линии передачи данных

При проведении моделирования сначала на передающем конце построчно формируются из реальной локационной голограммы (или имитатора локационной голограммы) информационные пакеты, которые последовательно передаются на несущей частоте 40 кГц.

Для воспроизведения в канале эффекта Доплера реализована возможность линейного или нелинейного (с ускорением или без ускорения) перемещения передатчика или приемника. Значение скорости относительного перемещения регулируется специализированным контроллером и лежит в пределах от 0 до 0,2 м/с.

Приемный и передающий ультразвуковые датчики обладают направленными свойствами, кроме того использование дополнительных рупорных ограничителей (насадок), прямофокусных и офсетных зеркальных рефлекторов позволяют учитывать при моделировании влияние диаграмм направленности передающей (приемной) позиций.

В общем виде в соответствии с [15] структурная схема УСПД состоит из источника и получателя сигналов, канала передачи, в состав которого входит ультразвуковой канал (рис. 2).

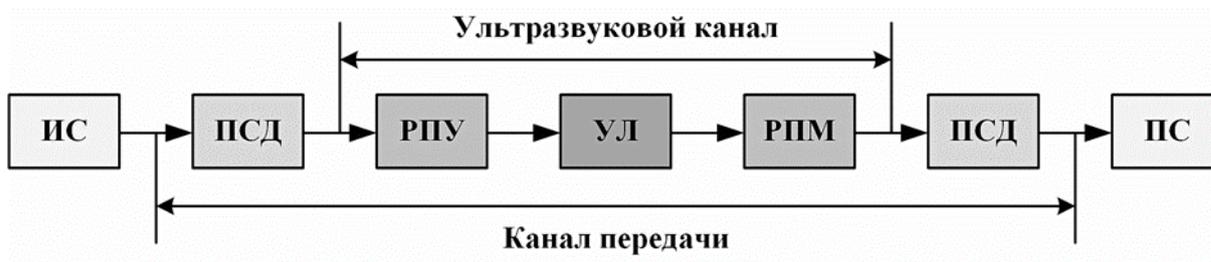


Рис. 2. Обобщенная структурная схема УСПД

Структурная схема УСПД включает в себя следующие элементы: ИС, ПС – источник и получатель сигнала данных; ПСД – преобразователи сигналов данных; УК – ультразвуковой канал.

Ультразвуковой канал включает: РПУ – ультразвуковой передатчик; РПМ – ультразвуковой приемник; УЛ – ультразвуковую линию (воздушная среда распространения).

Структурная схема УСПД с учетом особенностей программной реализации составных частей реализована с учетом обобщенной структурной схемы и представлена на рис. 3.

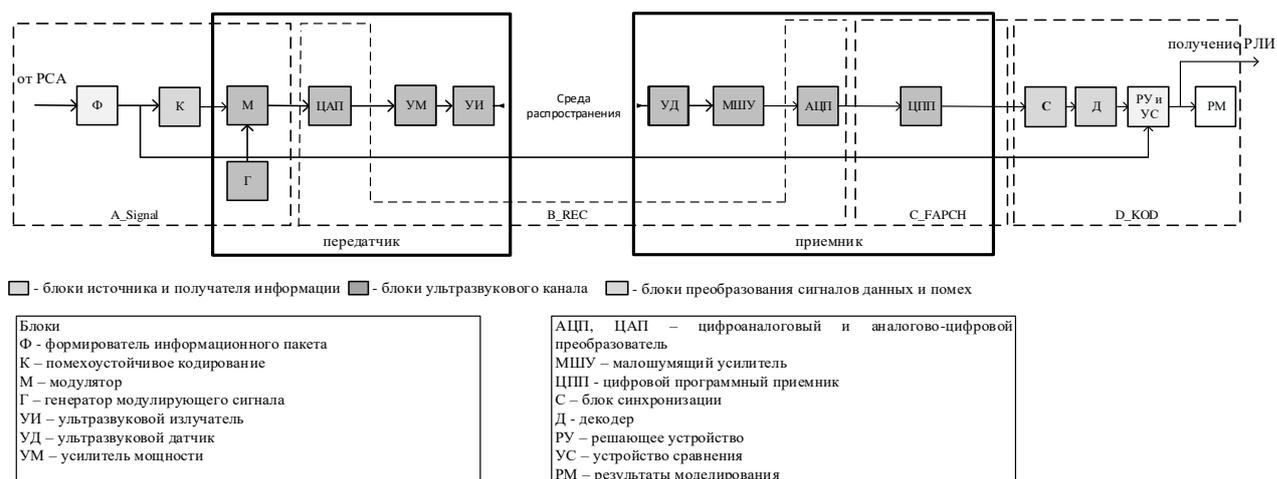


Рис. 3. Структурная схема лабораторной установки полунатурного моделирования УСПД

Штриховой линией обозначены линии разграничения основных подпрограмм «A_signal», «B_REC», «C_FAPCH», «D_KOD» предназначенных для управления работой РПУ и режимами работы РПМ или программной системой цифровой обработки информации.

Все основные программы были разработаны авторами в ходе построения лабораторной установки и реализованы в среде MatLab.

Ниже представлено краткое описание основных блоков структурной схемы УСПД.

Блок «Ф» (рис. 3) предназначен для формирования информационных пакетов. Информационный пакет состоит из трех частей (рис. 4б): синхропоследовательности, кода фазировки и блока основной части.



Рис. 4. Структура информационного пакета в УСПД:
а) информационный пакет УСПД; б) структура пакета

Синхропоследовательность разделяет между собой информационные пакеты и реализована на основе М-последовательности. Длина синхропоследовательности составляет 255 бит.

Код фазировки, следующий за синхропоследовательностью, необходим для корректного декодирования основной части и точной привязки фронтов чипов кода основной части информационного пакета в процессе вторичной обработки. Код фазировки задается кодом [0 0 0 1 1 1 0 0 0] и равен 9 бит и имеет длительность 9 мс.

Основная часть информационного пакета, используемая в режиме отладки УСПД, представляет собой произвольный массив 0 и 1. Формируется программным генератором, который позволяет формировать массивы случайных чисел с равномерным законом распределения. Длина выбранной основной части информационного пакета составляет 1000 бит. Основная часть информационного пакета, как отмечалось ранее, может формироваться и на основе реальных данных: комплексных отсчетов локационной голограммы.

Следует отметить, что поскольку формирователь реализован программно, это позволяет в перспективе рассматривать (исследовать) не только различные варианты внутренней структуры информационных пакетов, но и различные варианты кодов,

используемых для начальной синхронизации, т.к. это влияет на помехоустойчивость канала передачи.

Таким образом, длина информационного пакета, используемого для отладки УСПД составляет 1264 бита и имеет длительность 1,264 мс. Длительность чипа кода при моделировании составляет соответственно 1 мс.

Блоки «К» и «Д» (рис. 3) реализуют помехоустойчивое кодирование (декодирование) передаваемой (принимаемой) в линии связи информации за счет применения метода перемежения, сверточного кодирования, кодирования с использованием кодов Рида-Соломона и Боуза-Чоудхури-Хоквингема. В блоках «К» и «Д» использовались библиотечные подпрограммы, реализующие перечисленные виды кодирования (декодирования).

Обработка сигнала при моделировании УСПД реализована программно в блоке «ЦПП», с использованием разложения на квадратуры и гетеродинирования на нулевую частоту (рис. 3). Приемник алгоритмически реализован в подпрограмме «С_ФАРСН». Функциональная схема программного приемника представлена на рис. 5.

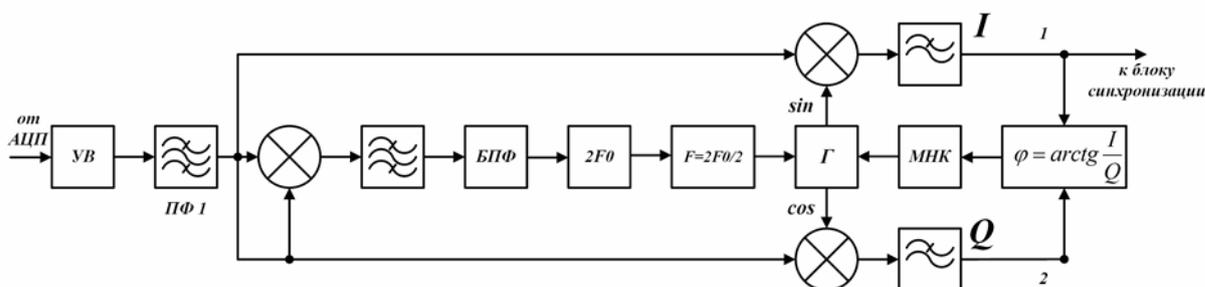


Рис. 5. Функциональная схема программного квадратурного приемника в составе УСПД

Блок управления выборкой «УВ» (рис. 5) реализует буферизацию входных данных и производит последовательную выборку («скользящим окном») фрагментов записанного сигнала для последующей обработки.

Первичный захват по частоте, компенсацию Доплеровского смещения частоты (вследствие воспроизводимого в установке относительного перемещения приемной и передающих позиций) и слежение за несущей частотой, производится с использованием программной системы частотной автоподстройки (ЧАП).

Для вычисления текущего значения несущей частоты входного сигнала используется операция возведения в квадрат в блоке «Квадратор». Возведение в квадрат приводит к «снятию» фазовой манипуляции, восстановлению сигнала несущей удвоенной частоты. Значение удвоенной частоты оценивается с помощью алгоритма БПФ в блоке «БПФ» (рис. 5). Таким образом, на выходе ЧАП формируется оценка несущей частоты в канале приема, которая поступает в блок программного управляемого гетеродина «Г» (рис. 5), который формирует опорные сигналы с заданной частотой и начальной фазой. Опорные сигналы поступают (с относительным сдвигом по фазе на $\pi/2$) на входы смесителей квадратурного приемника.

Кольцо программной ФАПЧ реализовано в установке по схеме Костаса. На выходе кольца формируется поправка фазы, которая поступает на вход управляемого гетеродина. Сглаживающие цепи ФАПЧ реализованы с использованием полиномиального сглаживания по алгоритму МНК и имеют порядок астатизма не ниже второго, что гарантировано обеспечивает устранение остаточной ошибки слежения за частотой, возникающей на выходе кольца ЧАП.

Программное управление параметрами ЧАП и ФАПЧ позволяет проводить исследование и подбор параметров астатизма программно реализованных колец слежения за частотой и фазой при различных структурах информационного пакета (длительности синхропоследовательности, длительности кода фазировки) и в зависимости от динамики и характера относительного перемещения передающей и приемной позиций, в т.ч. при воздействии различного рода помех, поскольку именно ЧАП и ФАПЧ являются наиболее уязвимыми при воздействии последних.

В результате на выходе квадратурного приемника при захвате ФАПЧ осуществляется выделение действительной составляющей принимаемого сигнала, которая записывается в массив «INFA» для последующего выделения передаваемого информационного сообщения.

Рис. 6 иллюстрирует процесс втягивания колец ЧАП и ФАПЧ при слежении за несущей принимаемого сигнала. На рис. 6 «а» и «б» в выносках показаны временные зависимости, соответствующие точкам 1 и 2 на схеме рис. 5.

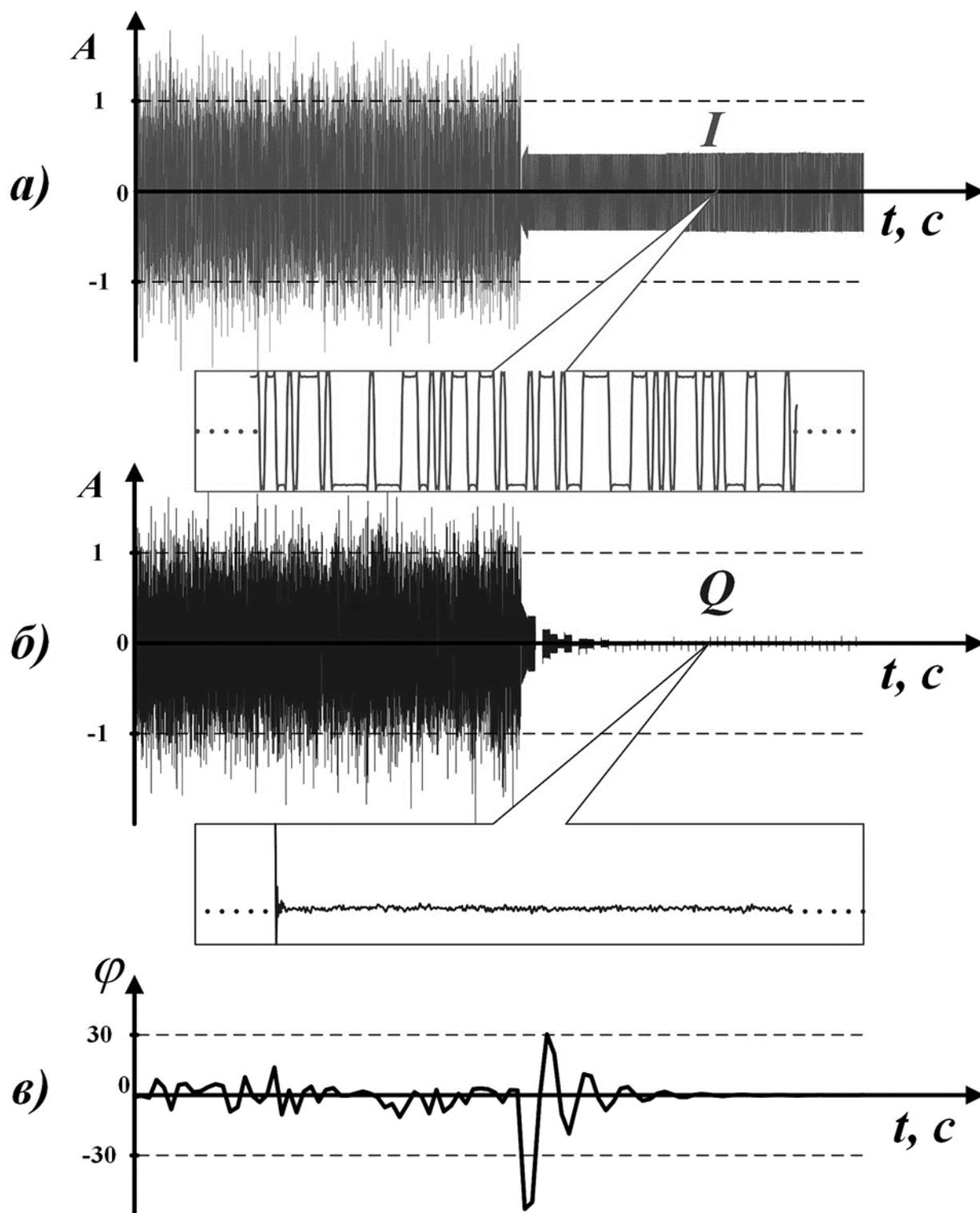


Рис. 6. Нормированные временные зависимости, характеризующие динамику перехода в режим захвата по частоте кольца ФАПЧ: а) действительная составляющая сигнала I и выделяемые символы информационного пакета; б) квадратурная составляющая сигнала Q ; в) сигнал на выходе кольца ФАПЧ

Выделение символов информации производится в блоке синхронизации «С» (рис. 3). С выхода ЦПП (рис. 3) (после захвата ФАПЧ) действительная составляющая I сигнала подается на блок синхронизации «С». В блоке синхронизации реализован программный коррелятор, вычисляющий в спектральной области свертку демодулированного сигнала с синхропоследовательностью заданной структуры. Затем аналогичным образом производится выделение кода фазировки. Анализ результатов корреляционной обработки позволяет решить задачу точного определения положения (задержки) фронтов чипов синхропоследовательности принимаемого сигнала и учесть (компенсировать) неоднозначность, обусловленную особенностями реализации дискриминатора ФАПЧ (на основе вычисления функции арктангенса отношения квадратурных составляющих) и проявляющуюся в инверсии символов принимаемого сообщения. Окончательное выделение символов информационного сообщения после декодирования в блоке «Д» производится в блоках «РУ и УС» – решающее устройство и устройство сравнения (рис. 3). Решающее устройство реализует накопление отсчетов сигнала на интервалах равных длительности чипа (1 мс) и формирование битового потока из «0» и «1» после сравнения с порогом результатов суммирования.

В блоке «РУ и УС» выполняется вычисление показателя битовой ошибки на программно заданном интервале времени. Коэффициент битовых ошибок (коэффициент ошибок по битам) BER – определяется как отношение числа принятых с ошибками бит к числу переданных бит, вычисляемый за определенный период времени T [17]. Для этого сигнал, полученный на выходе решающего устройства сравнивается с сигналом сформированным блоком «Ф» (рис. 3), что позволяет

определить (применительно к заданным условиям моделирования) количество ошибочно переданных бит $N_{\text{ош}}$ после чего сигналы переданный и принятый передаются на визуализацию в блок отображения результатов моделирования РМ (рис. 3). В соответствии с [17] вычисление битовой ошибки выполняется в соответствии с выражением $BER = N_{\text{ош}}/N$, где $N_{\text{ош}}$ – число ошибочно переданных бит, N – число переданных бит.

Схема, иллюстрирующая последовательность вызова (запуска) подпрограмм при реализации типового цикла моделирования УСПД, представлена на рис. 7.

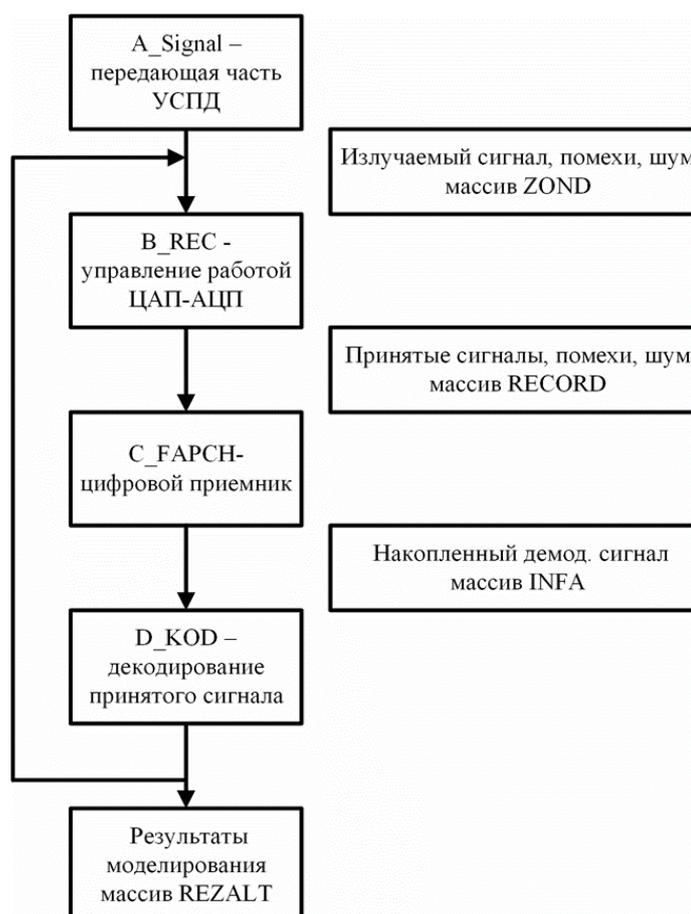


Рис. 7. Последовательность вызова подпрограмм при реализации цикла моделирования УСПД

Заключение

Разработанная лабораторная установка для проведения полунатурного моделирования УСПД и полученные результаты на этапе ее отработки позволяют сформулировать следующие выводы и предложения по направлениям дальнейших исследований:

1. Реализовано сопряжение макета УСПД с макетом РСА на базе локационного акустического комплекса [13], что позволит в дальнейшем сформировать макет сквозного информационного тракта РСА для отработки технологий комплексного повышения помехоустойчивости, технологий калибровки и юстировки.

2. Использование ультразвукового диапазона вполне оправдано и позволит проводить отработку в лабораторных условиях с использованием подходов полунатурного моделирования (что подтверждено на примере макета РСА [13])

3. Программная реализация цифровой обработки сигналов в лабораторной установке полунатурного моделирования УСПД позволит проводить исследования для различных структур сигналов и информационных пакетов в т.ч. для случаев воздействия различного рода помех.

4. Показана реализуемость применительно к ультразвуковому диапазону технологий помехоустойчивого кодирования в канале передачи данных, что позволит в дальнейшем исследовать помехоустойчивость УСПД при использовании различных типов помехоустойчивых кодов и их сочетаний.

5. Реализована и верифицирована методика прямого измерения значений битовой ошибки и отношения сигнал/шум, что обеспечит в дальнейшем корректное сравнение получаемых результатов.

6. Разработанный макет позволяет обрабатывать не только обработку в канале передачи данных, но и измерительные и информационные каналы в составе НАП ГНСС и перспективных РЛС с псевдошумовым зондирующим сигналом. Также полученные результаты могут найти применение при обработке перспективных гидроакустических систем локации и передачи данных на основе сложных шумоподобных сигналов.

7. Доступность программных модулей для внесения изменений и наглядность результатов моделирования позволяет применять УСПД в учебном процессе при изучении принципов построения и функционирования систем передачи данных и методов программного приема и обработки сигналов (SDR).

Библиографический список

1. Ефимов А.В., Зайцев С.Э., Савосин Г.В., Титов М.П., Цветков О.Е. Некоторые результаты испытаний космического аппарата «КОНДОР-Э» с РСА как основы новой радиолокационной космической системы // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 3. С. 24 - 36.
2. Занин К.А., Митькин А.С., Москатиных И.В. Методические основы моделирования информационного тракта космического радиолокатора синтезированной апертурой // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2016. № 2. С. 61 - 68.

3. Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Аппаратно-программное обеспечение стенда полунатурного моделирования для наземных испытаний космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. № 1. С. 53 - 60.
4. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. – М.: Радио и связь, 1986. - 184 с.
5. Семин А.И., Трофимов В.Н. Масштабное физическое гидроакустическое моделирование радиолокационных систем получения и обработки радиолокационных изображений высокого разрешения // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2005. № 3. С. 147 - 157.
6. Козлов А.В., Косынкин А.И., Мороз А.В., Сахно И.В., Соколов С.М., Пименов В.Ф., Шерстюк А.В. Моделирование многопозиционной радиолокационной системы с синтезированной апертурой антенны с использованием ультразвукового диапазона длин волн // Труды XXVIII Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред» (Санкт-Петербург, 16 -17 апреля 2013). – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2013. № 1. Т. 1. С. 419 - 429.
7. Шкапский Г.И., Курнина Д.В., Смолин В.П. Масштабное физическое ультразвуковое моделирование, его программная и аппаратная сторона // Технические науки – от теории к практике. 2012. № 7-1. С. 86 - 98.
8. Суханов Д.Я., Латипова Л.М. Ультразвуковидение в воздухе с применением крестовидной матрицы ультразвуковых излучателей и приёмников // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 8-2. С. 145 - 148.

9. Семин А.И., Трофимов В.Н. Масштабное физическое гидроакустическое моделирование радиолокационных систем получения и обработки радиолокационных изображений высокого разрешения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 4. С. 143 - 157.

10. Звонарев В.В., Мороз А.В., Шерстюк А.В. Методика оценивания характеристик диаграммы направленности ультразвукового локатора в режиме синтезирования апертуры антенны // Труды МАИ. 2019. № 106. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=105683>

11. Francois Vincent, Bernard Mouton, Eric Chaumette, Claude Nouals, Olivier Besson. Synthetic aperture radar demonstration kit for signal processing education // 32nd International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. «ICASSP – 2007», 2007, vol. 3, pp. 709 - 712. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICASSP.2007.366778>

12. Трофимов В.Н. Масштабное физическое гидроакустическое моделирование РЛС с синтезированной апертурой малой дальности для БПЛА // Журнал Радиоэлектроники. 2019. № 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep19/index.html>

13. Мороз А.В., Пименов В.Ф., Соколов С.М. Локационный акустический комплекс полунатурного моделирования радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны // Юбилейная 70-я Всероссийская научно-техническая конференция (СПБНТОРЭС): материалы конференции. – СПб.: СПБНТОРЭС имени А.С. Попова, 2015. Т. 1. С. 78 - 79.

14. Глыбин А.А., Бурцев Ю.В., Лычагин А. Ю., Черевань Д.В., Фуженко О.А., Мороз А.В. Технология комплексных натурных испытаний антенных модулей АФАР // Наноиндустрия. 2019. № S (89). С. 463 - 469. DOI: [10.22184/NanoRus](https://doi.org/10.22184/NanoRus)

15. Алфеев В.Ю., Артющин В.В. и др. Военные системы космической связи: учебник / Под. ред. Е.Н. Косякова. – СПб: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2003. - 451 с.
16. Передача данных. Термины и определения. ГОСТ 17657-79. – М.: Издательство стандартов, 1980. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200015668>
17. Слепов Н. Оценка показателей ошибок цифровых линий передачи // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2002. № 5. С. 22 - 31.
18. Козлов И.В., Набоков С.А., Смирнов А.С. Программа имитационного моделирования цифровых радиолиний передачи данных // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: http://trudymai.ru/published.php?ID=25408&PAGEN_2=2
19. Брызгалов А.П., Ковальчук И.В., Хныкин А.В., Шевела И.А., Юсупов Р.Г. Моделирование радиолокатора с синтезированной апертурой при решении задачи его внутреннего и внешнего проектирования // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=24734>
20. Серкин Ф.Б., Важенин Н.А., Вейцель В.В. Сравнительный анализ алгоритмов оценки отношения сигнал-шум на основе квадратурных компонент принимаемого сигнала // Труды МАИ. 2015. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=67824>
21. Мартиросов В.Е., Алексеев Г.А. Программная реализация системы фазовой автоподстройки частоты // Труды МАИ. 2013. № 71. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=47082>