

Научная статья
УДК 621.396
DOI: [10.34759/trd-2022-125-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-15)

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ

Анатолий Викторович Мороз¹, Игорь Викторович Сахно²,

Андрей Витальевич Шерстюк³

^{1,2,3}Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

^{1,2,3}vka@mil.ru

Аннотация. Статья продолжает цикл публикаций по полунатурному моделированию в лабораторных условиях канала передачи данных космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны в акустическом диапазоне. В статье представлены решения, которые позволяют воспроизвести в ультразвуковом диапазоне «сквозной тракт» передачи изображений и радиолокационных голограмм в системах дистанционного зондирования земли с учетом различий диапазонов. Представлены технические характеристики реализованной ультразвуковой линии. Конечной целью исследования является создание полунатурной лабораторной модели радиолокационного канала радиолокатора синтеза апертуры в ультразвуковом диапазоне.

Ключевые слова: радиолокационный канал, моделирование, ультразвуковой канал передачи данных, цифровой квадратурный приемник

Для цитирования: Мороз А.В., Сахно И.В., Шерстюк А.В. Технология передачи изображений в ультразвуковой линии связи // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-15)

Original article

TECHNOLOGY OF IMAGE TRANSMISSION IN AN ULTRASONIC COMMUNICATION LINE

Anatoly V. Moroz¹, Igor V. Sakhno², Andrey V. Sherstiuk³

^{1,2,3}Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,
Saint Petersburg, Russia

^{1,2,3}vka@mil.ru

Abstract. The paper presents a description of a large-scale physical modeling of a data transmission channel in the ultrasonic range through a medium, designed to solve the problems of evaluating testing of ground-based tests of an end-to-end radar path of a spacecraft with a synthesized aperture antenna and ground-based equipment for digital processing and formation of radar images. As a subject of research, digital information packages are considered, formed from a color or monochrome image, sequentially transmitted through a distribution medium. The main elements of an ultrasonic data transmission system are similar to those used in radio data transmission channels.

The need to solve this problem is due to the shortcomings of mathematical modeling in the form of introduced restrictions and assumptions. Thus, the aim of the work is to develop algorithms, software modules for transmitting raster (amplitude, analog) images and clarifying the research methodology on an ultrasonic data transmission system, as an integral part of the laboratory layout of the end-to-end radar path of a spacecraft with a synthesized antenna aperture.

The proposed large-scale physical modeling is based on the principle of line-by-line formed from a raster image of digital information packets that are sequentially transmitted in the ultrasonic range. After receiving and digital processing by a software receiver, the information is restored in the form of an image matrix.

The result of the work is a developed laboratory setup in the form of an ultrasonic data transmission system, which makes it possible to obtain an assessment of the quality of transmitted information packets with bitmap images. The technique for studying the noise immunity of a digital ultrasonic data transmission line has been refined. Algorithms for digital signal processing and software for the ultrasonic data transmission system have been improved. The technical characteristics of the layout are experimentally determined and the limits of its change are specified. The values of the signal-to-noise ratio are determined, at which there are no failures during the transmission of a raster image with a size of about 10^6 bits.

It is shown that the implemented model of the ultrasonic data transmission system can be used for image transmission when modeling the end-to-end information path of earth remote sensing systems. The visibility of the simulation results makes it possible to use the

ultrasonic data transmission system in the educational process when studying the principles of construction and operation of data transmission systems and methods of programmatic signal reception and processing.

The next stage of the work will be the transfer of acoustic holograms obtained at the location acoustic complex, which will make it possible to form a hardware-software stand for modeling the radar channel of a spacecraft with a synthesized antenna aperture.

Keywords: radar channel, modeling, ultrasonic data transmission channel, digital quadrature receiver

For citation: Moroz A.V., Sakhno I.V., Sherstiuk A.V. Technology of image transmission in an ultrasonic communication line. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-15](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-15)

Введение

В настоящий момент работы по созданию космических систем на основе радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (КРСА) получают все более широкое распространение и развитие.

Как известно, в структуру модели КРСА входит: совокупность моделей среды распространения зондирующего сигнала, моделей технических средств (бортового радиолокационного комплекса, высокоскоростной радиолинии передачи данных, и наземного комплекса приема, обработки и доведения информации), специального программного обеспечения (СПО) формирования радиолокационных изображений. Общепринятого термина объединяющего перечисленную совокупность разнесенных средств нет. Используются термины «информационный тракт», «сквозной тракт» и

ряд других. На наш взгляд наиболее приемлем термин радиолокационный канал, используемый в классической литературе в области радиолокации начиная с 50-х годов прошлого века [1-3].

Опыт, полученный по результатам летных испытаний МКА «Кондор -Э» [4], показывает, что при разработке КРСА чрезвычайно важным элементом является наземная экспериментальная отработка (НЭО) радиолокационного канала РСА. Для НЭО радиолокационного канала используются специализированные стенды, создаваемые в ходе выполнения ОКР [4-8]. В состав стенда включаются элементы реальной системы (например, аппаратно-программные средства формирования радиолокационных изображений). Часть элементов стенда, которые невозможно реализовать в наземных условиях реализуется с использованием моделирования. Таким образом, моделирование радиолокационного канала КРСА является чрезвычайно актуальной задачей.

В этой связи, авторами статьи выполняются исследования по разработке лабораторной модели радиолокационного канала КРСА, в которой КРСА и линия передачи данных реализуются на основе физического моделирования в ультразвуковом диапазоне. Описание локационного акустического комплекса полунатурного моделирования радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны представлено в работе [9]. В работе [5] были обоснованы направления разработки ультразвуковой системы передачи данных (УСПД), как составной части акустического комплекса для моделирования радиолокационного канала КРСА. Модели высокоскоростных спутниковых радиолиний передачи данных представлены также в ряде публикаций [10-15]. В большинстве работ исследования

выполняются на компьютерных моделях с использованием соответствующих пакетов прикладных программ. Наиболее близка к теме статьи программа имитационного моделирования цифровых радиолиний передачи данных, опубликованная авторами в статье [12]. Цель исследований в работе состояла в разработке алгоритмов, программных модулей и интерфейсной среды для сквозного моделирования процессов передачи информации в цифровых аэрокосмических радиолиниях связи. В программе предусмотрена работа с растровым изображением, характеризующимся 8-битной градацией цвета, следующих стандартных форматов: bmp; .jpg; .png; .tif; .gif. Оценка отношения сигнала к шуму осуществлялась путем прямого сравнения исходного изображения объекта с изображением, полученным в результате симуляционного моделирования. В статье не указано о разработке алгоритмов преобразования растрового изображения в битовый поток для передачи в радиоканале. Передача сигнала через среду при моделировании не выполняется и поэтому не учитывает ряда факторов реального распространения сигнала в пространстве.

Постановка задачи исследования

В публикации [5] представлена структурная схема цифрового приемо-передающего тракта с программной обработкой сигналов, технические характеристики установки и основы методики проведения моделирования. Для количественной оценки эффективности канала передачи данных используется общепринятый коэффициент битовых ошибок BER (Bit Error Rate). Коэффициент

BER – определяется как отношение числа принятых с ошибками бит к числу переданных бит, вычисляемый за определенный период времени T [16].

Алгоритмы СПО представленные в [5] были разработаны для отработки технологии передачи тестовых сообщений состоящих из произвольного набора бит нулей и единиц, для передачи полноформатных акустических голограмм, получаемых при моделировании РСА, требуется доработка СПО. Решение задачи полунатурного моделирования процесса передачи по ультразвуковой линии акустических голограмм необходимо выполнять в два этапа. На первом этапе СПО УСПД дорабатывается и апробируется для передачи изображений. На втором этапе будет выполнена доработка блоков программного обеспечения в составе стенда для передачи уже полноформатных акустических голограмм.

Цель статьи — привести описание особенностей разработки элементов УСПД, позволяющих обеспечить передачу изображений с использованием ультразвуковой линии передачи в составе стенда при моделировании радиолокационного канала.

Основная часть

На этапе отработки УСПД информационный пакет для построчной передачи бинарного кода информации состоял из трех частей: синхропоследовательности, кода фазировки и основной части (блока передаваемых данных) [5].

При моделировании в качестве теста было выбрано оптическое изображение в формате JPEG (рисунок 1, слева). Массив передаваемых данных изображения состоит из трех матриц (цветовых матриц) размерностью 249×153 отсчетов с уровнем

квантования 8 бит на один отсчет, содержащих, соответственно, интенсивности красного, зеленого и синего цветов каждого пиксела (блок И на рисунке 2).



Рис. 1. Цветное (слева) и монохромное тестовое оптическое изображение (справа)

С целью преобразования изображения в единый монохромный амплитудный массив (рисунок 1, справа), в структурную схему установки добавлен блок нормировки и суммирования цветных матриц (блок П на рисунке 2).

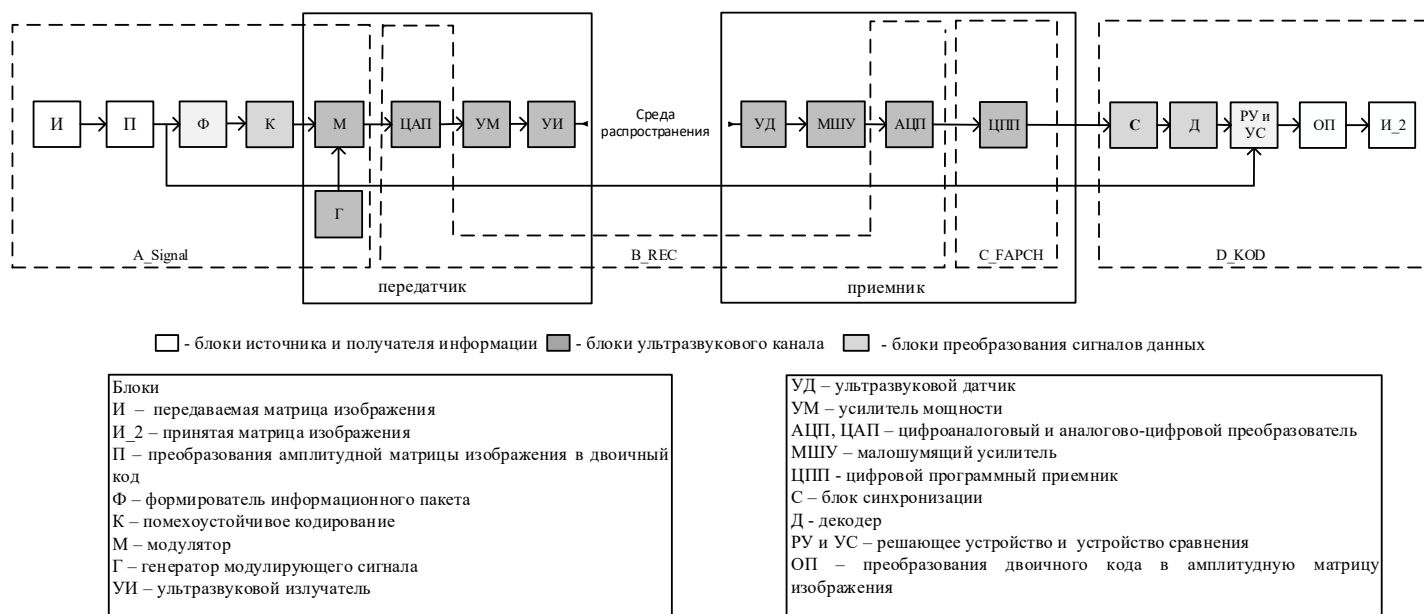


Рис. 2. Структурная схема УСПД в составе стенда моделирования радиолокационного канала

При преобразовании матрицы изображения к бинарному виду в блоке П выполняются следующие действия:

1. Считывание изображения из файла в трехмерный массив.
2. Нормировка амплитудных значений матриц R, G, B по максимальному значению амплитуды изображения.
3. Получение монохромной матрицы и приведение к выбранным уровням квантования 2^8-1 .
4. Построчное преобразование десятичных чисел матрицы в бинарный (двоичный) код для передачи по двоичному каналу (рисунок 3).
5. Построчное формирование информационного пакета с преамбулой, синхропоследовательностью и кодом фазировки и информационной частью.
6. Модуляция ФМ-2 (далее BPSK — binary phase-shift keying) несущей частоты с заданными параметрами.
7. Циклическая, построчная передача информации и асинхронный прием в цикле с записью в буфер для последующей обработки.

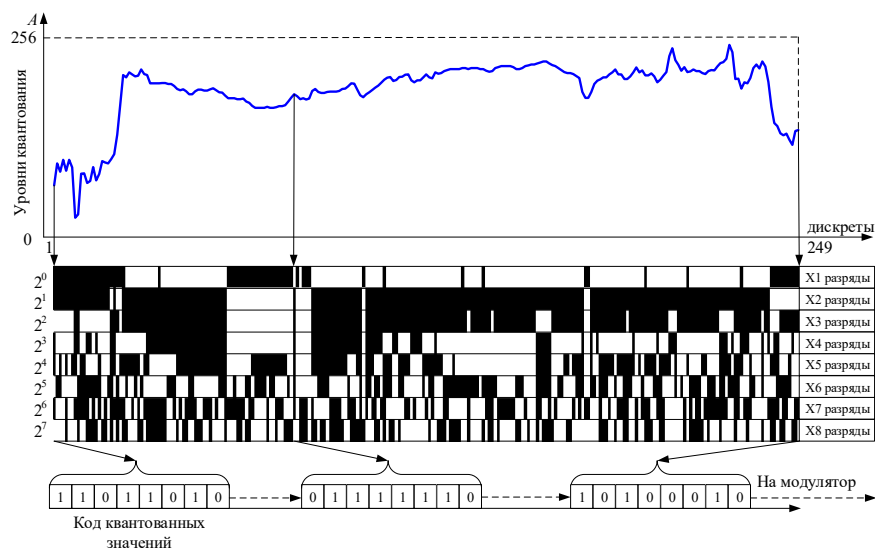


Рис. 3. Преобразование десятичных чисел матрицы в двоичный код для передачи

На рисунке 3 показано преобразование дискретных значений A аналоговой строки изображения в обычный двоичный код по основанию 2. Цифровой код представлен в виде ряда, каждое квантованное значение состоит из 8 бит. Цифровой код квантованных значений последовательно передается на модулятор.

После передачи через среду распространения и асинхронной записи сигнала на несущей производится цифровая обработка сигнала с демодуляцией и декодированием, синхронизацией в блоке С. В устройстве РУ из декодированного сигнала производится обратное преобразование двоичного сигнала в амплитудную монохромную матрицу изображения ОП с последующей визуализацией в блоке И_2 (рисунок 2).

Матрица изображения передается построчно. Для изображения (рисунок 1) в случае передачи в виде монохромного изображения имеем количество бит, формируемых для передачи изображения $249 \times 153 \times 8 = 304776$. Увеличение размера строки изображения ($249 \times 8 = 1992$) привело к изменению структуры

информационного пакета (рисунок 4), описание которого было представлено [5]. Структура пакета включает: преамбулу строки, синхропоследовательность и код фазировки. В исследовании не ставилась задача полного соответствия структуры передаваемого пакета требованиям ГОСТ Р 56096-2014 [17], поэтому поле под заголовок пакета, счетчик пакетов, код времени не выделяется.

Преамбула необходима для вхождения системы частотной и фазовой автоподстройки частоты (ЧАПЧ и ФАПЧ) в синхронизм. Для синхронизации (блок С на рисунке 2) в структуре информационного пакета (рисунок 4) применяется M-последовательность со следующими характеристиками: число разрядов регистра – 10; образующий полином из 10 единиц; номер каскада обратной связи 3.

Для осуществления корректной демодуляции сигналов BPSK в приемнике программно реализована схема ЧАПЧ, которая отслеживает частотные уходы вследствие взаимного перемещения передатчика и приемника, а также вследствие нестабильности среды распространения. Уточнение значения несущей частоты производится возведением принятого сигнала в квадрат, определением удвоенной несущей в частотной области на выходе алгоритма быстрого преобразования Фурье. Уточненное значение частоты используется далее в структуре модели УСПД в гетеродине в блоке демодуляции квадратурных составляющих сигнала. Фаза сигнала гетеродина отслеживается программной ФАПЧ, реализованной в виде петли Костаса [5].

При демодуляции начинает проявляться эффект, который обусловлен периодичностью функции арктангенса (используемой в модели ФАПЧ). Для устранения периодичности применен код фазировки - уникальной

последовательности бит после синхропоследовательности перед блоком пользовательских данных, который исключает уход фазы больше чем на 2π за счет инверсной корректировки декодированного сигнала. Использование кода фазировки так же, позволяет до такта дискретизации синхронизовать фронты декодированных сигналов для последующей обработки.

Препамбула строки 1000 бит	Синхр. 1024 бит	Код фазировки 9 бит	Пользовательские данные 1992 бит
-------------------------------	--------------------	------------------------	-------------------------------------

Рис. 4. Структура информационного пакета

Длина информационного пакета зависит от задаваемой разрядности квантования и от размера исходного изображения (для тестового изображения информационный объем одной строки составляет 4025 бит).

Объем передаваемого изображения имеет принципиальное значение, поскольку это значение в конечном итоге во многом определяет минимальную подтверждаемую вероятность битовой ошибки в ходе каждого цикла моделирования линии связи. Например, при передаче 304776 бит в ходе моделирования, вероятность ошибки при сбое одного бита составляет величину $\sim 10^{-6}$.

Исследования проводились на аппаратно-программном стенде для моделирования в ультразвуковом диапазоне радиолокационного канала с интегрированной в его состав линии передачи данных.

Состав стенда моделирования (рисунок 5):

безэховая камера (БЭК) в ультразвуковом диапазоне с мишенным полем,

ультразвуковая система передачи данных,
ПЭВМ с СПО для управления работой УСПД и обработки изображений,
измерительная и обеспечивающая аппаратура и др.

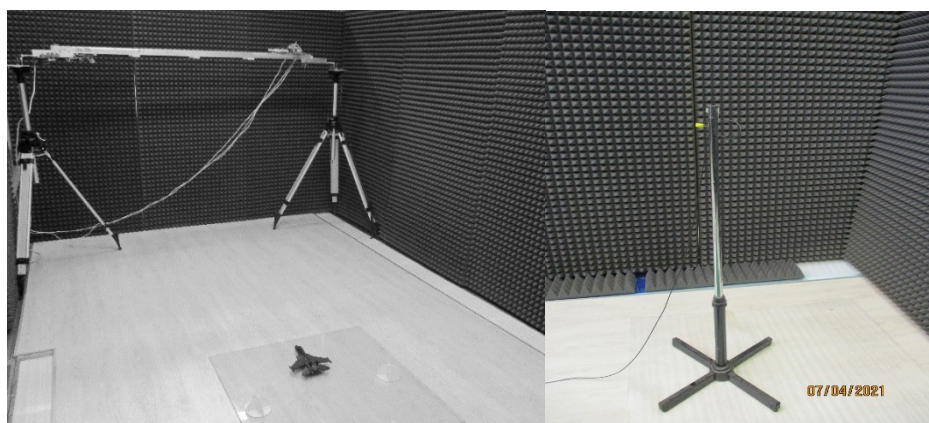


Рис. 5. Безэховая камера, внутри которой находится модуль линейного перемещения акустического локатора с синтезированной апертурой антенны, передатчик (слева) и приемник УСПД (справа)

Методика выполнения исследований

В ходе проведения моделирования снималась зависимость вероятности битовой ошибки от значения отношения сигнал/шум (ОСШ) при фиксированной величине амплитуды выходного сигнала передатчика.

В течении дня получали несколько значений вероятности битовой ошибки при различных амплитудах выходного колебания передатчика.

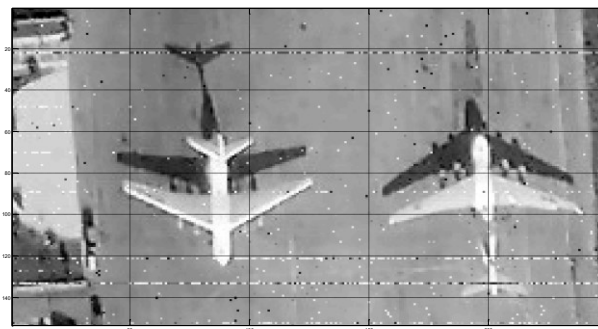


Рис. 6. Принятое изображение с различными видами сбоев.

На рисунке 6 представлено принятое (блок И_2) изображение с характерными видами сбоев: одиночными, сбои строк целиком или частично (строки 22, 89, 121, 133, 152). В ряде случаев наблюдаемые сбои строк имели циклический характер, например, когда наблюдались сбои отдельных участков (изображения) определенной длительности в связи с возникновением срыва синхронизации и возникновения фазовой неоднозначности в канале приема.

На рисунке 7 представлены теоретическая (2) и экспериментально полученная (1) при передаче тестового изображения зависимости величины битовой ошибки от значения отношения сигнал/шум.

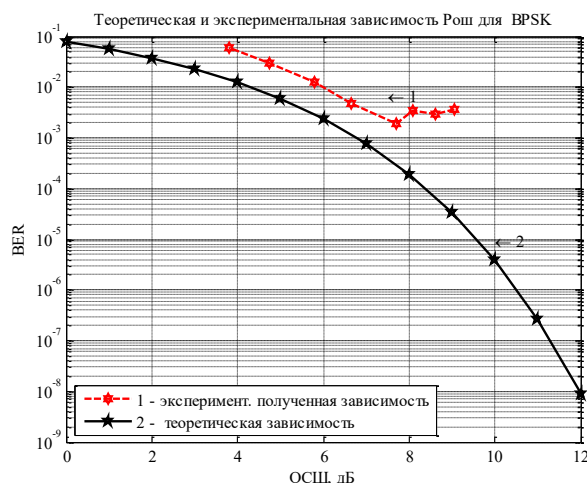


Рис. 7. Теоретическая и экспериментально полученная зависимость битовой ошибки от отношения сигнал /шум

Верхний график построен по экспериментальным данным в ходе полунатурного моделирования. График теоретической зависимости вероятности ошибки сигнала BPSK в условиях воздействия белого гауссовского шума определялся в соответствии с выражением

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right), \quad (1)$$

где E_b – энергия бита сигнала, одного импульса цифровой информации;

N_0 – однополосная спектральная плотность белого шума [18, 19];

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left[-\frac{y^2}{2}\right] dy = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right), \quad (2)$$

где $x > 0$.

Необходимо отметить, что зависимость битовой ошибки от отношения сигнал шум в реальных системах значительно отличается от теоретической (потенциальной)

зависимости. Тем не менее, кривая, построенная по экспериментальным данным (рисунок 7), не следует тенденции теоретической кривой, так как с ростом отношения сигнал/шум значение битовой ошибки не уменьшается, а возрастает. Причина состоит в том, что при увеличении отношения сигнал/шум происходит сбой синхронизации в строках передаваемого изображения по причине вхождения МШУ в режим (насыщения) отсечки и искажения мощного принимаемого сигнала, что объясняется отсутствием в структуре модели блока автоматического регулирования усиления (АРУ). Для улучшения качества приема также были предприняты следующие дополнительные меры.

Для улучшения качества экстраполяции значения угла фазы в блоке ФАПЧ изменена степень аппроксимирующего полинома по методу наименьших квадратов в блоке МНК цифрового приемника (описание программного квадратурного приемника представлено в [5]).

В блоке синхронизации С была увеличена база М-последовательности. Изменения на качественную картину сбоев не повлияли. Было принято решение об изменении длительность «скользящего» окна обработки в блоке управления выборкой УВ, что привело к улучшению качества демодуляции принятого сигнала за счет отслеживания динамики фазы между квадратурными составляющими. Первоначально длительность «скользящего» окна обработки было 0,2с. Последовательно окно уменьшали до 0,015с. Количество артефактов и сбоев принятого сигнала значительно уменьшилось. Уменьшение длительности окна обработки привело к увеличению времени работы УСПД. Длительность одного цикла

передачи изображения с учетом времени обработки имеет продолжительность до ~ 2,5 часов.

Реализация эффективного блока АРУ может быть реализована за счет использования логарифмирования входного сигнала при превышении некоторого порога, который подбирается экспериментально.

Далее методика выполнения исследований претерпела следующие изменения. Первоначальный подход, когда в течении одного дня получали несколько значений вероятности битовой ошибки при различных значениях амплитуды выходного сигнала передатчика, показал свою неэффективность. В результате перешли к получению нескольких значений вероятности битовой ошибки при одинаковом значении амплитуды выходного колебания с последующим усреднением.

На рисунке 8 представлена теоретическая и экспериментально полученная зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал шум для сигнала BPSK. Экспериментально полученная кривая в целом соответствует теоретической зависимости.

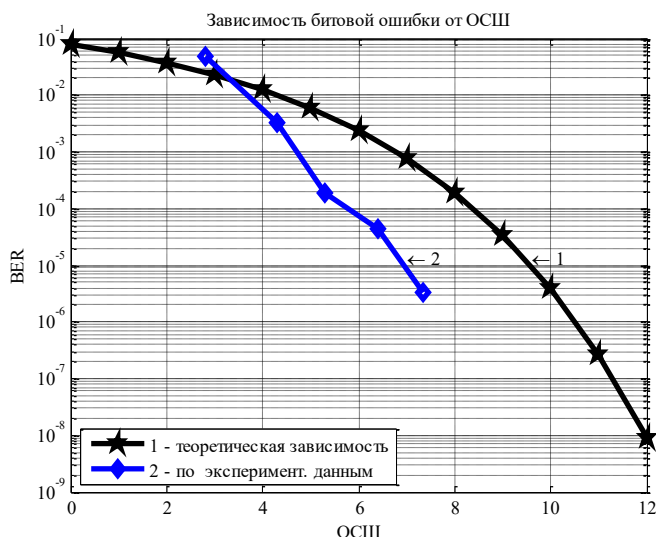


Рис. 8. Теоретическая и экспериментально полученная зависимость вероятности битовой ошибки от ОСШ

Причина отклонения экспериментально полученной зависимости от теоретической состоит в том, что при построении теоретической кривой не учитывается влияние ЧАПЧ, ФАПЧ, и среды распространения при полунатурном моделировании.

Участок устойчивой работы УСПД, на котором нет сбойных строк и единичных сбоев соответствует значению ОСШ $\sim 8-10$ дБ (ввиду отсутствия сбоев данный участок на кривой 2 рисунке 8 не показан). В этом режиме сбоев строк и единичных сбоев не наблюдается. При значении ОСШ более 11 дБ возможно появление сбоев строк целиком при полном отсутствии единичных сбоев.

Для реальных систем экспериментально установлено [20], что при отношении E_b/N_0 , приблизительно равном или большем 12 дБ, выбор сигнала, обеспечивающего малую частоту ошибки на бит, не представляет труда. Проблема выбора сигнала возникает лишь в том случае, когда отношение E_b/N_0 менее 12 дБ. Для этой области производится сравнение структур сигналов, выбираемых для канала передачи данных с гауссовским шумом. Таким образом, разработанная УСПД позволяет проводить исследования по отработке структур сигналов и методов их программной обработки при наиболее проблемных значениях ОСШ в канале приема.

В результате разработки реализованы следующие технические характеристики УСПД, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики УСПД

№п/п	Характеристики	Значение
1.	Несущая частота сигнала	10 ÷ 100 кГц
2.	Длина волны	3,4 ÷ 0,34 см
3.	Тип модуляции	BPSK
4.	Вид сигнала	цифровой
5.	Способ формирования и обработки сигнала	программный
6.	Способ захвата и синхронизации по частоте (программно)	ЧАПЧ, ФАПЧ
7.	Вид кодовой последовательности для синхронизации	M -последовательность
8.	Длительность чипа (битового символа)	0,001 с
9.	Скорость передачи данных	> 1 кбит/с
10.	Динамический диапазон изменения значений ОСШ	0 – 10 дБ
11.	Предельная дальность работы УСПД	до 10 метров
12.	ДН передающей и приемной антенны	80°

Сравнение с результатами, полученными другими авторами

В настоящий момент в публикациях по теме исследования крайне мало экспериментальных данных, полученных при передаче изображений через среду распространения. Большая часть публикаций посвящена разработке программных имитационных моделей. Наиболее близка к теме статьи работа [12] в которой описана программа имитационного моделирования цифровых радиолиний передачи данных. На рисунке 9 представлены передаваемое (слева) и принятое (справа) изображения.

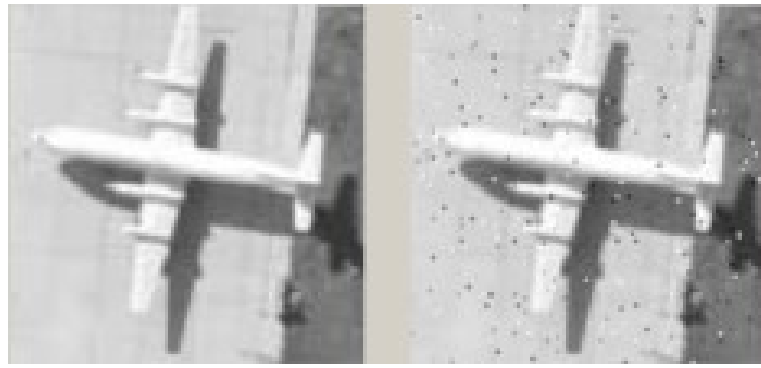


Рис. 9. Передаваемое (слева) и принятое изображение (справа)

Визуально характер одиночных сбоев на принятых изображениях идентичен с полученными на УСПД.

Заключение

1. Разработана технология передачи изображений в ультразвуковом диапазоне и реализована в макете УСПД.
2. Уточнена методика исследования помехоустойчивости цифровой ультразвуковой линии передачи данных. Доработаны алгоритмы ЦОС и программное обеспечение УСПД.
3. Экспериментально определены технические характеристики макета и уточнены пределы его изменения. Определены пороговые значения ОСШ, при котором отсутствуют сбои.
4. Показано, что реализованный макет УСПД может использоваться для передачи изображений при моделировании сквозного информационного тракта систем ДЗЗ в лабораторных условиях.

5. Следующим этапом работы будет передача акустических голограмм, полученных на локационном акустическом комплексе [9], что позволит сформировать аппаратно-программный стенд для моделирования радиолокационного канала (сквозного тракта) КРСА.

6. Реализованный подход позволяет также повысить эффективность НЭО элементов тракта систем ДЗЗ, начиная с этапа эскизного проектирования: отработать алгоритмы программной реализации блоков обработки сигнала; новые сигналы; элементы тракта; алгоритмы адаптивного сжатия изображений и голограмм.

Список источников

1. Кондратенков Г.С. Авиационные системы радиовидения: монография. - М.: Радиотехника, 2015. – 648 с.
2. Коростелев А.А., Ключев Н.Ф., Мельник Ю.А. и др. Теоретические основы радиолокации. – М.: Советское Радио, 1978. – 608 с.
3. Кондратенков Г.С. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
4. 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.

5. Гусев С.Н., Миклин Д.В., Мороз А.В., Сахно И.В., Шерстюк А.В. Полунатурное моделирование цифрового канала передачи данных в ультразвуковом диапазоне длин волн // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118128>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-08](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-08)
6. Занин К.А., Митькин А.С., Москатиный И.В. Методические основы моделирования информационного тракта космического радиолокатора синтезированной апертурой // Вестник НПО имени С.А.Лавочкина. 2016. № 2. С. 61-68.
7. 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.
8. Брызгалов А.П., Ковальчук И.В., Хныкин А.В., Шевела И.А., Юсупов Р.Г. Моделирование радиолокатора с синтезированной апертурой при решении задач его внутреннего и внешнего проектирования // Труды МАИ. 2011. № 43. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=24734>
9. Мороз А.В., Пименов В.Ф., Соколов С.М. Локационный акустический комплекс полунатурного моделирования радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны // Материалы юбилейной 70-й Всероссийской конференции (СПБНТОРЭС). - СПб.: СПБНТОРЭС им. Попова, 2015. Т. 1. С. 78-79.
10. Жиров В.А., Орлов А.Е., Смирнов А.А. Модель радиолинии спутниковой связи в составе высокоскоростной спутниковой системы // Труды учебных заведений связи. 2018. № 3. С. 45-53.

11. Костров Б.В., Соломенцева Н.И. Моделирование канала связи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 2. С. 95-100.
12. Козлов И.В., Набоков С.А., Смирнов А.С. Программа имитационного моделирования цифровых радиолиний передачи данных // Труды МАИ. 2010. № 45.
URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=25408&PAGEN_2=2
13. Носов В.И., Дегтярев С.С. Анализ помехоустойчивости спутниковой линии связи с модуляцией M-APSK при учете нелинейных искажений // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. 2017. № 6. С. 14-22.
14. Куприянова О.В., Левенец А.В., Чье Ен Ун. Моделирование систем передачи данных с адаптацией к состоянию канала связи // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. Т. 62. № 1. С. 120–132.
15. Атыева И.Р., Зыкин А.А., Хворенков В.В. Имитационная модель спутникового канала связи // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22. № 1. С. 100–107.
16. Слепов Н. Оценка показателей ошибок цифровых линий передачи // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2002. № 5. С. 22-31.
17. Система передачи космических данных и информации. Пакетная телеметрия (Переиздание). ГОСТ Р 56096-2014. – М.: Стандарты, 2014.
18. Прокис Дж. Цифровая связь. - М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
19. Песков С.Н., Ищенко А.Е. Расчёт вероятности ошибки в цифровых каналах связи // Телеспутник. 2010. № 10. С. 70-75.

20. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М.: Мир, 1986. – 576 с.

References

1. Kondratenkov G.S. *Aviatsionnye sistemy radiovideniya* (Aviation radio vision systems), Moscow, Radiotekhnika, 2015, 648 p.

2. Korostelev A.A., Klyuev N.F., Mel'nik Yu.A. et al. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* (Theoretical foundations of radar), Moscow, Sovetskoe Radio, 1978, 608 p.

3. Kondratenkov G.S. *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Radio vision. Radar systems for remote sensing of the Earth), Moscow, Radiotekhnika, 2005, 368 p.

4. Efimov A.V., Zaitsev S.E., Savosin G.V., Titov M.P., Tsvetkov O.E. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2016, no. 3, pp. 24-36.

5. Gusev S.N., Miklin D.V., Moroz A.V., Sakhno I.V., Sherstyuk A.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118128>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-08](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-08)

6. Zanin K.A., Mit'kin A.S., Moskatina I.V. *Vestnik NPO imeni S.A.Lavochkina*, 2016, no. 2, pp. 61-68.

7. Lepekhina T.A., Nikolaev V.I. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*, 2013, no. 1, pp. 53-60.

8. Bryzgalov A.P., Koval'chuk I.V., Khnykin A.V., Shevela I.A., Yusupov R.G. *Trudy MAI*, 2011, no. 43. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=24734>

9. Moroz A.V., Pimenov V.F., Sokolov S.M. *Materialy yubileinoi 70-i Vserossiiskoi konferentsii (SPbNTORES)*, Saint Petersburg, SPbNTORES im. Popova, 2015, vol. 1, pp. 78-79.
10. Zhirov V.A., Orlov A.E., Smirnov A.A. *Trudy uchebnykh zavedenii svyazi*, 2018, no. 3, pp. 45-53.
11. Kostrov B.V., Solomentseva N.I. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 2, pp. 95-100.
12. Kozlov I.V., Nabokov S.A., Smirnov A.S. *Trudy MAI*, 2010, no. 45. URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25408&PAGEN_2=2
13. Nosov V.I., Degtyarev S.S. *Sovremennaya nauka: Aktual'nye problemy teorii i praktiki*, 2017, no. 6, pp. 14-22.
14. Kupriyanova O.V., Levenets A.V., Ch'e En Un. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, vol. 62, no. 1, pp. 120–132.
15. Atyeva I.R., Zykin A.A., Khvorenkov V.V. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2019, vol. 22, no. 1, pp. 100–107.
16. Slepov N. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2002, no. 5, pp. 22-31.
17. *Sistema peredachi kosmicheskikh dannykh i informatsii. Paketnaya telemetriya GOST R 56096-2014* (Space data and information transmission system. Packet telemetry, State Standart R 56096-2014), Moscow, Standarty, 2014.
18. Prokis Dzh. *Tsifrovaya svyaz'* (Digital communications), Moscow, Radio i svyaz', 2000, 800 p.
19. Peskov S.N., Ishchenko A.E. *Telesputnik*, 2010, no. 10, pp. 70-75.

20. Bleikhut R. *Teoriya i praktika kodov, kontroliruyushchikh oshibki* (Theory and practice of error–controlling codes), Moscow, Mir, 1986, 576 p.

Статья поступила в редакцию 01.06.2022

Статья после доработки 03.06.2022

Одобрена после рецензирования 20.06.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 01.06.2022; approved after reviewing on 20.06.2022; accepted for publication on 25.08.2022