

УДК 621.396.96

DOI 10.51955/2312-1327_2023_1_77

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЯЦИИ LORA В СРЕДСТВАХ РАДИОСВЯЗИ, НАВИГАЦИИ И НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

*Муслим Амирович Межетов,
orcid.org/0000-0002-9509-6169,
кандидат физико-математических наук
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
milsumka@mail.ru*

*Борис Валентинович Лежанкин,
orcid.org/0000-0001-5504-0884,
кандидат технических наук, доцент
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
lezhbor@mail.ru*

*Анна Ивановна Тихова,
orcid.org/0000-0003-1494-8954,
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
tikhova_a.i@mail.ru*

*Ульяна Сергеевна Вахрушева,
orcid.org/0000-0003-1854-4121,
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
uvakhrusheva@mail.ru*

Аннотация. В работе рассмотрено применение технологии LoRa в системе передачи данных при решении задач определения местоположения воздушных судов по сети наземных станций многопозиционной системы наблюдения. Актуальность данной проблемы заключается в том, что используемые способы передачи данных не удовлетворяют требованиям надёжности и скрытности передаваемой информации, следовательно, такие системы не защищены от несанкционированного доступа. Передаваемая информация представляет стратегическую важность при решении задач организации воздушного движения на территории РФ. Несанкционированный доступ может привести к перехвату и искажению координатной информации о местоположении воздушного судна. Такая ситуация возможна только в исключительном случае, который приведёт к снижению безопасности полётов и переходу предпосылок к лётным происшествиям в авиационные инциденты. Увеличить надёжность передаваемой информации возможно применением в системах передачи данных

шумоподобных сигналов, которые обеспечивают лучшие показатели скрытности передаваемых сигналов и обладают повышенной помехозащищённостью. В настоящее время широкое распространение получила новая технология передачи данных LoRa. В основе этой технологии лежит применение линейной частотной модуляции, которая на протяжении нескольких десятилетий используется в радиолокационных системах. В работе представлен алгоритм функционирования системы передачи данных многопозиционной системы наблюдения, а также проведено его полунатурное моделирование с реализацией в виде виртуального устройства.

Ключевые слова: линейная частотная модуляция, многопозиционная система наблюдения, технология LoRa.

USE OF LORA MODULATION IN RADIO COMMUNICATION, NAVIGATION AND SURVEILLANCE AIDS FOR PERFORMING AIR TRAFFIC CONTROL TASKS

*Muslim A. Mezhetov,
orcid.org/0000-0002-9509-6169,
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Moscow State Technical University of Civil Aviation
(Irkutsk Branch),
Kommunarov, 3
Irkutsk, 664047, Russia
milsumka@mail.ru*

*Boris V. Lezhankin,
orcid.org/0000-0001-5504-0884,
Candidate of Technical Sciences,
Moscow State Technical University of Civil Aviation
(Irkutsk Branch),
Kommunarov, 3
Irkutsk, 664047, Russia
lezhbor@mail.ru*

*Anna I. Tikhova,
orcid.org/0000-0003-1494-8954,
Moscow State Technical University of Civil Aviation
(Irkutsk Branch),
Kommunarov, 3
Irkutsk, 664047, Russia
tikhova_a.i@mail.ru*

*Ulyana S. Vakhrusheva,
orcid.org/0000-0003-1854-4121,
Moscow State Technical University of Civil Aviation
(Irkutsk Branch),
Kommunarov, 3
Irkutsk, 664047, Russia
uvakhrusheva@mail.ru*

Abstract. The paper considers the use of LoRa technology in the data transfer system for performing aircraft position-fixing by means of the network of multilateration ground stations. The urgency of the problem is that the methods used for transferring data do not meet the requirements for safety and security of the transmitted information so such systems are not protected against unauthorized access. The information transmitted is strategically important for performing air traffic

management tasks on the territory of the Russian Federation. Unauthorized access can result in intercepting and spoofing the coordinate information of aircraft location. This is possible only in exceptional circumstances which lead to reduction in flight safety and transition of flight incidents to flight accidents. The security of transmitted information can be improved by applying noise-like signals which ensure better security indexes of transmitted signals and possess higher jamming resistance. A new LoRa technology of transferring data is widespread nowadays. The technology is based on the linear frequency modulation which has been used in radar systems for several decades. The paper presents the algorithm of operating the multilateration data transfer system and its hardware-in-the-loop simulation implemented as a virtual device.

Key words: Linear frequency modulation, multilateration surveillance system, LoRa technology.

Введение

В соответствии со стратегией развития организации воздушного движения (ОрВД) в Российской Федерации, направленной на повышение безопасности, регулярности и эффективности полётов ВС, приоритетным направлением является разработка комплекса системных решений, основанных на использовании проектно-технических методов по созданию системы новых информационно-навигационных сервисов с использованием базы многопозиционных систем (МПСН) и многофункциональных (мультисервисных) технологий. В связи с этим разработан план действий и функций, включающий мероприятия по реализации общепринятой «Концепции внедрения автоматического зависимого наблюдения», основанной на использовании единого стандарта. Результатом реализации плана является многопозиционная система наблюдения в РФ, содержащая комплекс документарной базы, на основе которого подготовлены основные выводы для внесения изменений в программные документы ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» [Кирюшкин и др., 2019; Тележкин и др., 2012].

Для устойчивого и непрерывного функционирования системы информационно-навигационных сервисов (ИНС), линии связи должны обладать требуемой пропускной способностью, высоким уровнем информационной безопасности и защиты. Это достигается путём применения современных систем и средств передачи данных, использующих эффективные методы криптостойкого и помехоустойчивого кодирования.

Анализ применения систем передачи данных при реализации функции наблюдения

В многопозиционной системе наблюдения (МПСН) применяется способ определения координат по времени задержки принятого сигнала, получаемого от одного источника излучения сетью приёмных станций, находящихся на различных расстояниях от него. Важным параметром, который измеряют станции, является интервал времени прохождения сигнала от воздушного судна (ВС) (источника излучения) до наземной станции (приёмника), входящей в состав сети многопозиционной системы наблюдения (МПСН). В системе МПСН точность определения координат определяется количеством приёмных станций, участвующих в расчёте координатной информации, а также геометрией их

размещения. Чем больше таких приёмников, тем выше точность определения местоположения воздушного судна на всей траектории его полёта. Большое число одновременно работающих приёмных станций в системе МПСН предъявляет особые требования к каналу передачи данных, который должен обеспечивать надёжность и достоверность передаваемой информации. Наземные каналы передачи информации, при относительной простоте реализации, имеют существенные недостатки, заключающиеся в подверженности кабельных и волоконно-оптических сетей механическим повреждениям, а также в высокой вероятности несанкционированного доступа.

Этих недостатков лишены каналы, использующие беспроводные линии передачи данных. Для реализации такого канала необходимо наличие специализированного оборудования и алгоритмического обеспечения, реализующего его функционирование. В настоящее время такое оборудование и соответствующее программное обеспечение находятся в свободном использовании эксплуатантов средств наблюдения. Поэтому применение простых алгоритмов шифрования и модуляции не решает проблем несанкционированного доступа к информации о местоположении воздушного судна. Дополнительным условием для успешного решения задачи эффективной передачи данных является подавление помех, действующих в канале связи.

Радиоканал характеризуется наличием помех, действующих в линии передачи, в оборудовании приёма и обработки сообщений. Помехи, имеющие искусственное или естественное происхождение, снижают качество принимаемой информации, что усложняет решение задачи предоставления координатной информации в сети МПСН с требуемой точностью.

Решить проблему помехоустойчивости и обеспечить защиту передаваемой информации возможно, применяя шумоподобные сигналы на основе использования тех видов модуляции, которые способны обеспечить заданную скрытность каналов системы передачи данных. Шумоподобные сигналы (ШПС) обладают следующими преимуществами:

- их использование позволяет реализовать наиболее эффективные оптимальные методы обработки сигналов;
- достигается гораздо лучшая помехоустойчивость в канале связи;
- устраняется эффект многолучевости и повышается энергоэффективность при приёме сигналов за счёт разделения лучей и независимой обработки информации по каждому лучу;
- возможность совместного использования одного частотного канала одновременно несколькими абонентами за счёт кодового разделения сигналов;
- высокая эффективность при решении задач по организации скрытности и замаскированности информационного сигнала в канале передачи данных;
- возможность совместной работы с узкополосными системами в условиях взаимного влияния, что обеспечивает хорошую электромагнитную совместимость (ЭМС);
- эффективность распределения частотных ресурсов в спектре в заданной зоне действия системы.

Проведённый анализ показал, что в настоящее время наиболее распространёнными ШПС, используемыми при организации каналов передачи данных являются:

1) Последовательности (коды) Баркера. Последовательность Баркера – это ряд, состоящий из N элементов a_j , равных «+1» или «-1», для $j=0,1,\dots, N-1$ чередующихся так, что выполняется условие:

$$\left| \sum_{j=0}^{N-v} a_j a_{j+v} \right| \leq 1$$

для всех $1 \leq v < N$.

Последовательности Баркера (рис. 1) являются последовательностями с минимальным уровнем боковых лепестков автокорреляционной функции, который равен $1/N$, примеры последовательностей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Последовательности Баркера

Длина	Последовательности
2	+1-1 +1+1
3	+1+1-1
4	+1-1+1+1 +1-1-1-1
5	+1+1+1-1+1
7	+1+1+1-1-1+1-1
11	+1+1+1-1-1-1+1-1-1+1-1
13	+1+1+1+1+1-1-1+1+1-1+1-1+1

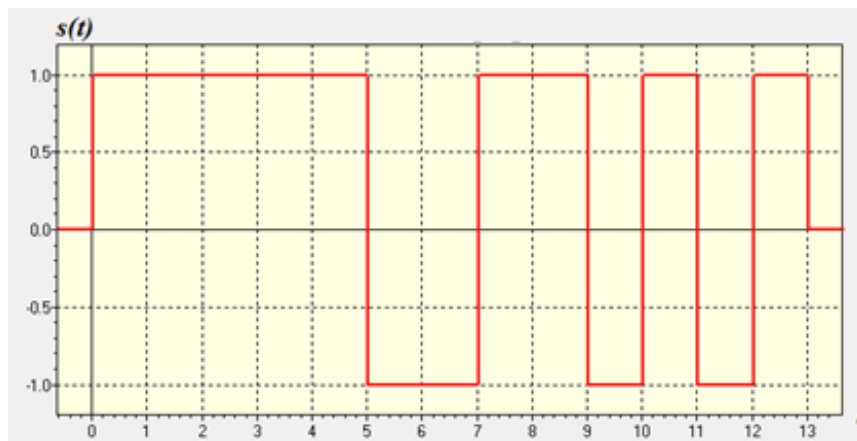


Рисунок 1 – Сигнал, соответствующий коду Баркера длиной 13 символов

Представленный сигнал может применяться в качестве модулирующей функции при формировании высокочастотного колебания, для передачи по каналу связи с использованием фазовой манипуляции (ФМн), фаза которого принимает два значения: 0 или π ; в соответствии с кодом Баркера (рис. 2).

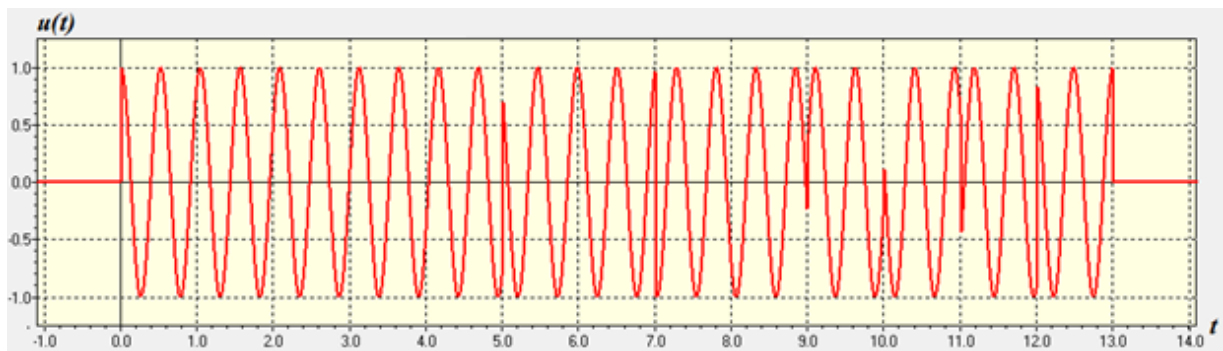


Рисунок 2 – Фазоманипулированный сигнал на основе кода Баркера при N =13

Главным преимуществом использования кодов Баркера является то, что величина максимального бокового выброса их автокорреляционной функции (АКФ) не превышает $1/N$, где N – длина кодовой последовательности (рис. 3).

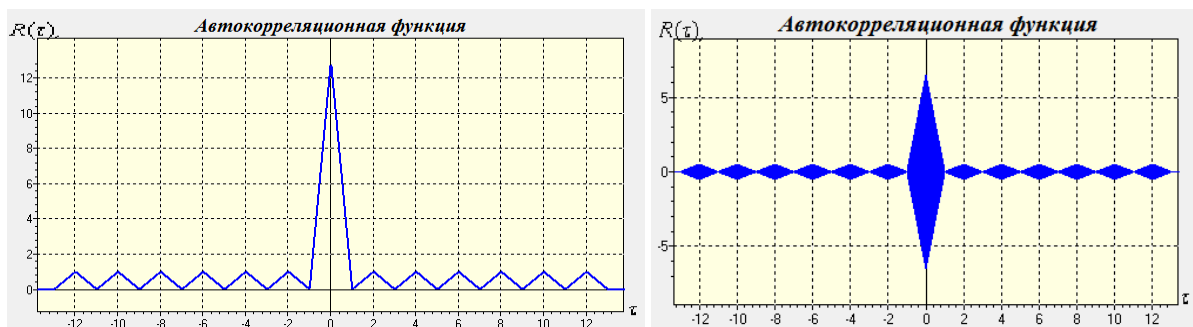


Рисунок 3 – АКФ сигнала Баркера для N=13

Существенным недостатком является то, что известных последовательностей Баркера всего 8, максимальная длина последовательности достигает 13-ти разрядов, поэтому поиск кодовых последовательностей длины $N > 13$, у которых величина максимального бокового выброса АКФ не превышала бы $1/N$, представляет актуальную задачу [Сенявин, 2017].

2) M-последовательность. Двоичная последовательность символов d_i , принимающих значения +1 или -1. Алгоритм формирования двоичной псевдослучайной последовательности определяется следующим рекуррентным соотношением:

$$d_i = -d_{i-n} \cdot d_{i-m} \dots d_{i-1},$$

где $n > m > \dots > 1, i = (n+1) \div N$.

Выбрав в качестве первых n элементов последовательности любые наборы положительных и отрицательных единиц (кроме набора, содержащего одни отрицательные единицы), можно, при определенном значении k , получить последовательность максимальной длины (M-последовательность). Каждый период M-последовательности (рис. 4) содержит $N_{max} = 2^n - 1$ элементов d_i , т.е. содержит все возможные комбинации из n двоичных символов, кроме

комбинации, содержащей одни отрицательные единицы. Вследствие этого число положительных единиц в последовательности на единицу больше числа отрицательных [Сенин, 2014], т.е.

$$\sum_{i=1}^N d_i = 1 \quad (1)$$

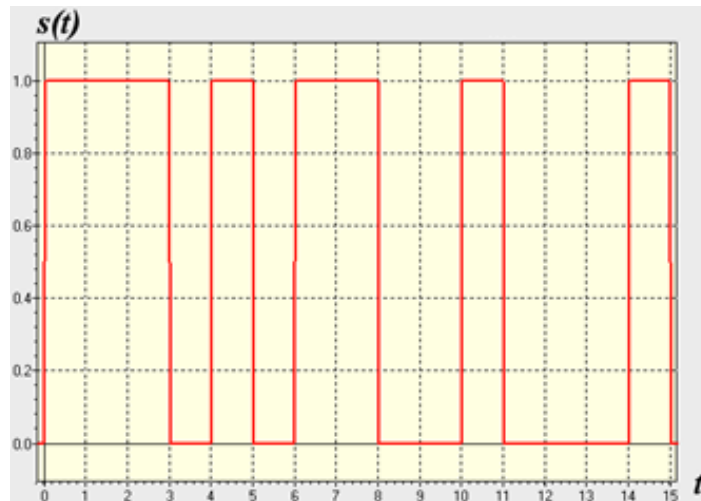


Рисунок 4 – Кодированная М-последовательность для $N=15$

На рисунке 5 изображен ФМн сигнал на основе М-последовательности для $N=15$.

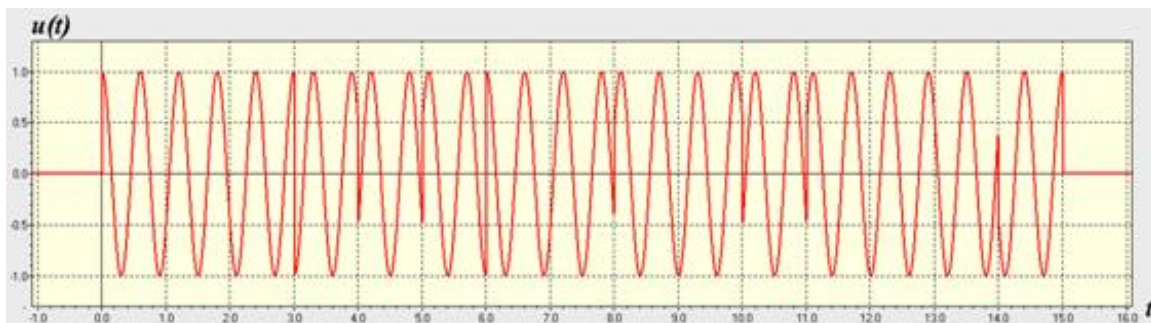


Рисунок 5 – ФМн сигнал на основе М-последовательности для $N=15$

Данный вид шумоподобного сигнала обладает большими преимуществами. Боковые пики аperiodической АКФ сигналов, образованных М-последовательностью, равны $1/\sqrt{N}$, что говорит о его высокой помехозащищенности (рис. 6). Для уменьшения пиков боковых лепестков необходимо увеличивать длину последовательности, что приводит к росту помехозащищенности. Недостатком этого ШПС является повышение в несколько раз объёма данных, необходимых для передачи сообщения, а также наличие большого корреляционного шума.

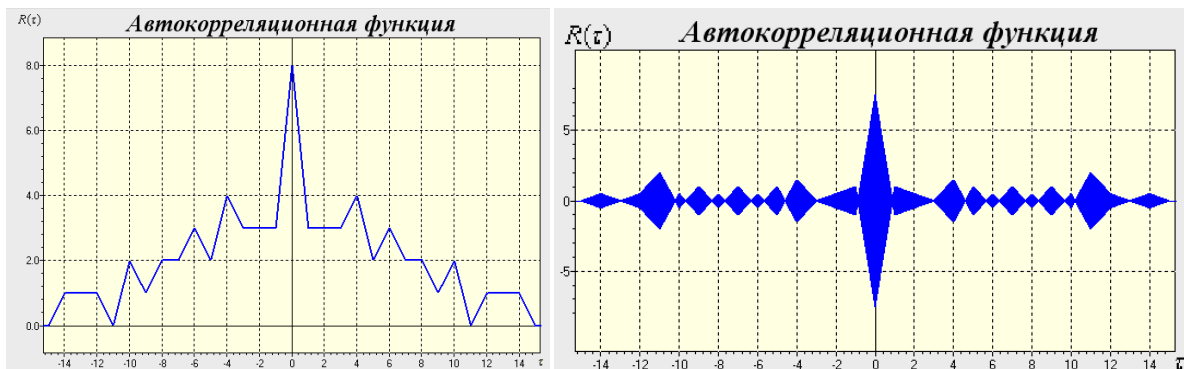


Рисунок 6 – Аperiodическая АКФ M-последовательности

3) Сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). ЛЧМ сигнал – это сигнал с частотной модуляцией, при которой частота несущей изменяется по линейному закону (рис. 7), где f_0 – несущая частота, Δf – девиация частоты, $\tau_{\text{н}}$ – длительность сигнала.

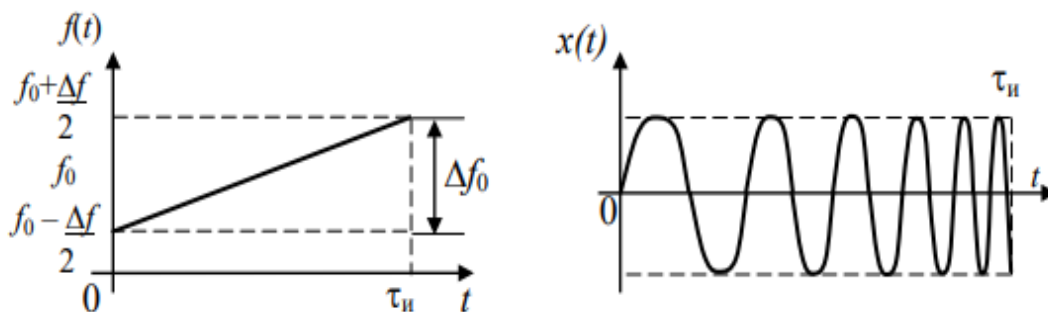


Рисунок 7 – Линейная частотная модуляция

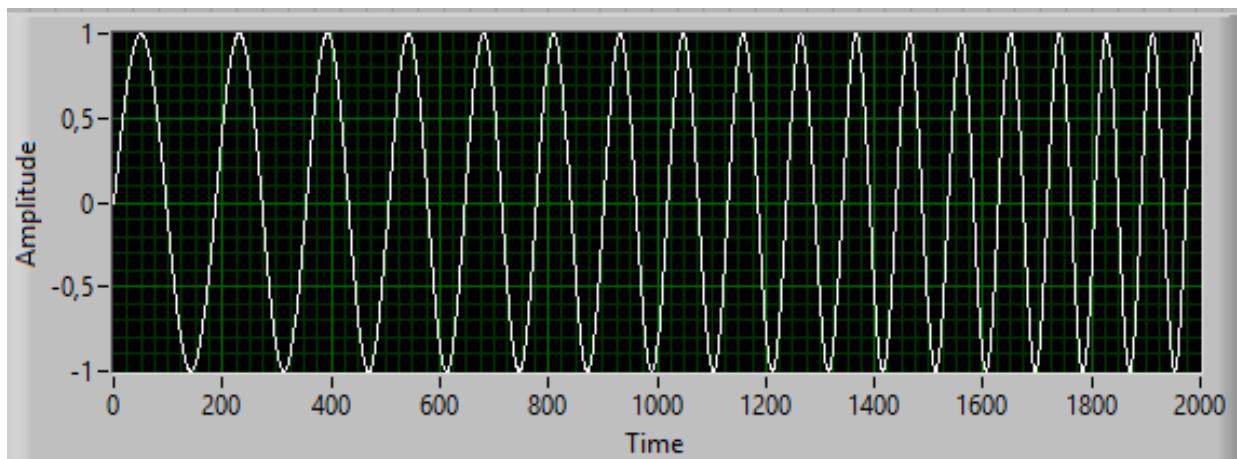
ЛЧМ сигналы, ввиду своей природы формирования, имеют ряд преимуществ перед остальными шумоподобными (сложными) сигналами, заключающимися в следующем:

- возможность формирования сигнала с большим диапазоном изменения параметра модуляции: девиация частоты составляет 1 ГГц и более;
- высокая скорость изменения параметра модуляции, соответствующая скорости частотной перестройки;
- простота смены закона изменения параметра модуляции сигнала;
- возможность обнаружения и исправления искажений, возникающих в процессе распространения в канале передачи данных [Саджид и др., 2022].

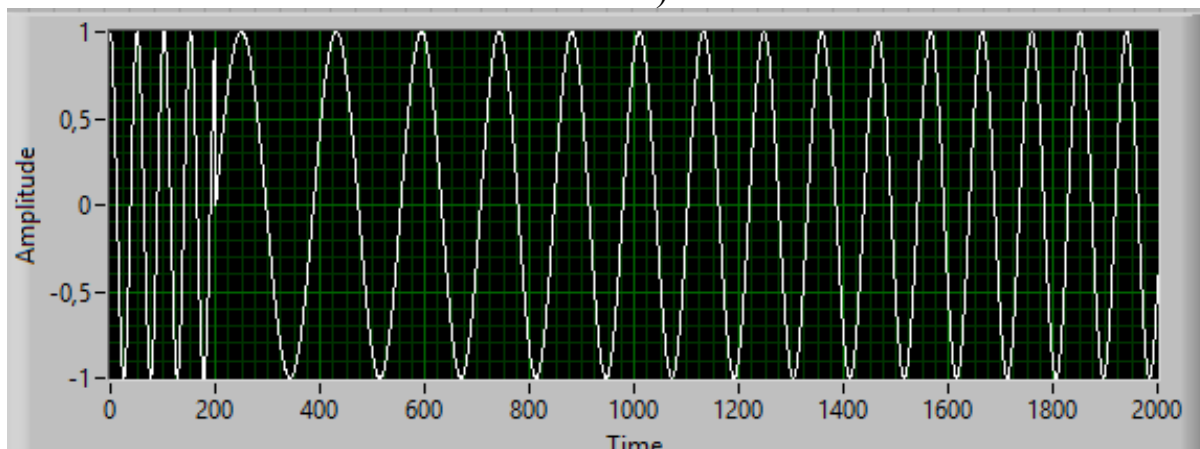
Метод повышения помехоустойчивости и достоверности передачи данных для решения задач управления воздушным движением

В радиолокационных системах (системах наблюдения), на протяжении уже нескольких десятков лет, активно используется режим работы в дальней зоне обнаружения с применением ЛЧМ сигналов (рис. 8.а). Использование данного режима обусловлено устранением противоречия между импульсной мощностью (дальностью действия) средства наблюдения и разрешающей способностью

(точностью измерения параметров сигнала) путём расширения спектра излучаемого сигнала [Марычев и др., 2012]. В системах передачи данных ЛЧМ сигналы используются относительно недавно: в настоящее время в таких системах применяется технология LoRa (рис. 8.б) [Антонова и др., 2017; Межетов и др., 2021]. LoRa – это технология и одноимённый метод модуляции. Метод модуляции LoRa запатентован компанией Semtech, основан на технике расширения спектра, при которой данные кодируются изменением частоты внутри импульса. При этом частота может увеличиваться или уменьшаться на некотором временном интервале [Верхулевский, 2016; Каримова и др., 2019].



а)



б)

Рисунок 8 – Вид сигнала: а) – опорный сигнал ЛЧМ;
б) – информационный сигнал

Структура пакета данных стандарта LoRa представлена на рисунке 9. Информационный пакет состоит из синхропреамбулы и последовательности данных. Синхропреамбула предназначена для синхронизации по частоте приёмной аппаратуры с передаваемым сообщением. Процесс синхронизации заключается в подстройке частоты генератора опорного ЛЧМ сигнала приёмника, что необходимо для последующей демодуляции информационной последовательности данных, следующих за синхропреамбулой.

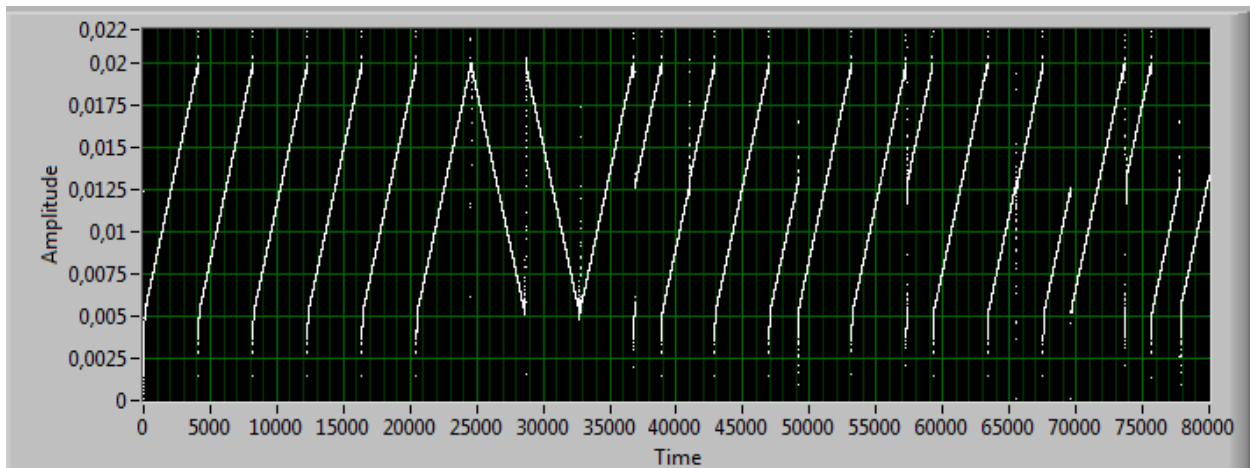


Рисунок 9 – Структура информационного пакета данных стандарта LoRa: синхропреамбула (до 2500 отсчёта), информационная часть сигнала с 2500 отсчёта

Процесс (алгоритм) выделения синхропреамбулы заключается в построении согласованного фильтра, импульсная характеристика которого комплексно сопряжена с законом изменения модулирующей функции (вверх, вниз), и представляет собой зеркальное отображение сигнала во временной области:

$$h(t) = A_1 * \cos\left(\omega_H * (T_{sym} - t) - \frac{\mu}{2} * (T_{sym} - t)^2\right), 0 \leq t < T_{sym}, \quad (2)$$

где A_1 – амплитуда; ω_H – нижняя частота радиосигнала; T_{sym} – длительность радиосигнала; μ – коэффициент крутизны модулирующей функции, определяющий скорость изменения частоты радиосигнала.

Метод кодирования символьной информации в последовательности данных заключается в реализации в ШПС частотного смещения $e^{j*\Delta\omega*k*t}$ относительно опорного колебания $e^{j*(\omega_H*t+\mu*t^2)}$, где $k=0,1,2,\dots,2^{SF}$ – значения информационных символов, размерностью SF бит:

$$x(t) = \begin{cases} A_0 * \cos\left(\omega_H * t + \Delta\omega * k * t + \frac{\mu}{2} * t^2\right), 0 \leq t < T_0 \\ A_0 * \cos\left(\omega_H * t + \Delta\omega * k * t - BW * t + \frac{\mu}{2} * t^2\right), T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases}, \quad (3)$$

где BW – ширина спектра радиосигнала, SF – коэффициент расширения спектра, $\Delta\omega$ – частотное смещение.

Возможное алгоритмическое представление системы обработки, сформированной для канала передачи данных технологии LoRa, представлено в виде блок-схемы на рисунке 10.

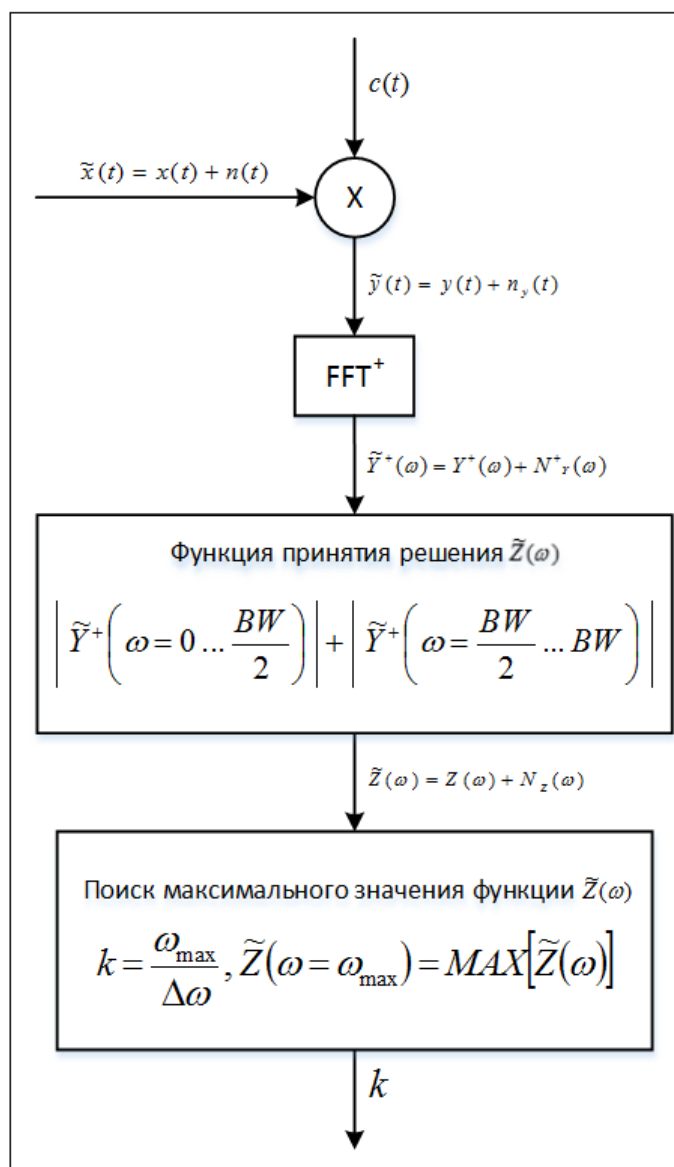


Рисунок 10 – Возможная блок-схема алгоритма обработки сигнала LoRa

Здесь:

$c(t) = A_1 * \cos\left(\omega_H * t + \frac{\mu}{2} * t^2\right), 0 \leq t < T_{sym}$ – опорное колебание,

$n(t), 0 \leq t < T_{sym}$ – действующий в канале передачи данных белый гауссовский шум.

Принятый в канале передачи данных сигнал представляет собой перемножение сдвинутой копии с опорным колебанием:

$$y(t) = x(t) * c(t) = \frac{A_0 * A_1}{2} * \begin{cases} \cos(\Delta\omega * k * t) + \cos(2 * \omega_H * t + \Delta\omega * k * t + \mu * t^2), 0 \leq t < T_0 \\ \cos(BW - \Delta\omega * k * t) + \cos(2 * \omega_H * t + \Delta\omega * k * t - BW * t + \mu * t^2), T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (4)$$

Ограничившись в выражении первыми членами, получим:

$$y(t) = \frac{A_0 * A_1}{2} * \begin{cases} \cos(\Delta\omega * k * t), 0 \leq t < T_0 \\ \cos([BW - \Delta\omega * k] * t), T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (5)$$

На выходе блока FFT+, реализующего функцию переноса сигнала в частотную область посредством преобразования Фурье, формируется спектр:

$$\begin{aligned} Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) * e^{-i\omega t} dt = & \frac{A_0 * A_1}{4} * e^{-j(\omega - \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}} * T_0 * \frac{\sin[(\omega - \Delta\omega k) * \frac{T_0}{2}]}{(\omega - \Delta\omega k) * \frac{T_0}{2}} + \\ & \frac{A_0 * A_1}{4} * e^{-j(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} * (T_{sym} - T_0) * \frac{\sin[(\omega - (BW - \Delta\omega k)) * (T_{sym} - T_0) / 2]}{(\omega - (BW - \Delta\omega k)) * (T_{sym} - T_0) / 2} + \\ & \frac{A_0 * A_1}{4} * e^{-j(\omega + \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}} * T_0 * \frac{\sin[(\omega + \Delta\omega k) * \frac{T_0}{2}]}{(\omega + \Delta\omega k) * \frac{T_0}{2}} + \frac{A_0 * A_1}{4} * e^{-j(\omega + (BW - \Delta\omega k)) \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} * \\ & (T_{sym} - T_0) * \frac{\sin[(\omega + (BW - \Delta\omega k)) * (T_{sym} - T_0) / 2]}{(\omega + (BW - \Delta\omega k)) * (T_{sym} - T_0) / 2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Крайние слагаемые в выражении не оказывают существенного влияния в области отрицательных частот и оказывают незначительное воздействие в области положительных, поэтому ими можно пренебречь:

$$\begin{aligned} Y^+(\omega) &= Y_1(\omega) + Y_2(\omega), \text{ где} \\ Y_1(\omega) &= \frac{A_0 * A_1}{4} * e^{-j(\omega - \Delta\omega k) \frac{T_0}{2}} * T_0 * \frac{\sin[(\omega - \Delta\omega k) * \frac{T_0}{2}]}{(\omega - \Delta\omega k) * \frac{T_0}{2}} + \\ Y_2(\omega) &= \\ &= \frac{A_0 * A_1}{4} * e^{-j(\omega - (BW - \Delta\omega k)) \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} * (T_{sym} - T_0) * \frac{\sin[(\omega - (BW - \Delta\omega k)) * (T_{sym} - T_0) / 2]}{(\omega - (BW - \Delta\omega k)) * (T_{sym} - T_0) / 2}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для устранения взаимного влияния соседних слагаемых $Y^+(\omega)$ при разных значениях k необходимо выполнить условие $\Delta\omega < \frac{BW}{2 * k}$.

Следовательно,

$$\Delta\omega = \frac{BW}{2^{SF+1}}, \quad (8)$$

$$T_0 = \frac{(2^{SF+1} - k)}{2^{SF+1}} * T_{sym}. \quad (9)$$

На следующем этапе вычисляется функция принятия решения $Z(\omega)$, представляющая собой сумму модулей функции $Y_1(\omega)$ и функции $Y_2(\omega)$, зеркально отраженной относительно точки $\omega = BW$:

$$Z(\omega) = Y_1(\omega) + Y_2(BW - \omega) \approx Y^+(\omega) + Y^+(BW - \omega), \quad (10)$$

где $\omega = 0 \dots \frac{BW}{2}$; $k=0, 1, 2, \dots, 2^{SF}$ – информационный символ, размерностью SF бит [Ватрич и др., 2021].

Определение значения передаваемого в канале символа осуществляется путем нахождения частоты ω , соответствующее максимуму функции $Z(\omega)$:

$$\tilde{Z}(\omega = \omega_{max}) = MAX[\tilde{Z}(\omega)], \quad (11)$$

$$k = \frac{\omega_{max}}{\Delta\omega}. \quad (12)$$

Представленная технология LoRa – реализуется посредством организации радиоканала и не требует проводных линий, таких как кабельные и оптоволоконные, отличающиеся высокой пропускной способностью, однако подверженные несанкционированному вмешательству с целью осуществления возможности перехвата и искажения данных, представляющих в системах МПСН стратегическую информацию, связанную с обеспечением требуемой безопасности полетов гражданской и государственной авиации. Организация узконаправленных радиолиний, а также применение пространственной и временной обработки данных позволяет существенно повысить скрытность передаваемой информации.

Производитель сертифицированной широкополосной МПСН «Мера» реализует передачу данных между составными частями с использованием:

- сети передачи данных по стандарту Ethernet (используется протокол TCP/IP);
- оптических линий связи.

Однако, когда речь идет об организации систем МПСН в труднодоступных районах Российской Федерации, организация стационарных, проводных каналов существенно затруднена, единственным эффективным решением является построение радиоканалов с перспективными технологиями обмена данными, которой является технология LoRa.

Основными техническими характеристиками технологии LoRa при организации высокоэффективных каналов обмена данными между составными частями МПСН являются:

- частотный диапазон, определенный для Российской Федерации 864-869 МГц;
- ширина спектра радиосигнала порядка 125 кГц;
- мощность передачи 1-25 мВт;
- максимальная дальность действия определяется прямой видимостью между передатчиком и приемником;
- максимальная скорость передачи данных между составными частями МПСН составляет 50000 бит/с.

Представленные характеристики радиоканала с применением технологии LoRa позволяют в полном объеме обеспечить потребность как аэродромной, так и широкозонной МПСН, с возможностью применения многоцелевого структурированного обмена информацией наблюдения Евроконтроля по протоколу ASTERIX cat.21 с привязкой к системе единого времени сообщений.

Результаты и обсуждение

На основе представленного алгоритма реализации метода модуляции LoRa, для повышения помехоустойчивости и скрытности линии передачи данных в МПСН, разработана модель функционирования системы с применением графической среды программирования «NI LabVIEW». Особенностью использования данного программного продукта является наличие обширной базы реализованных радиотехнических устройств и возможность визуализации процесса обработки сигналов в реальном масштабе времени [Ерохин, 2016; Ерохин и др., 2021; Скрыпник и др., 2020; Туринцев и др., 2022]. Внешний вид лицевой панели разработанной модели представлен на рисунке 11.

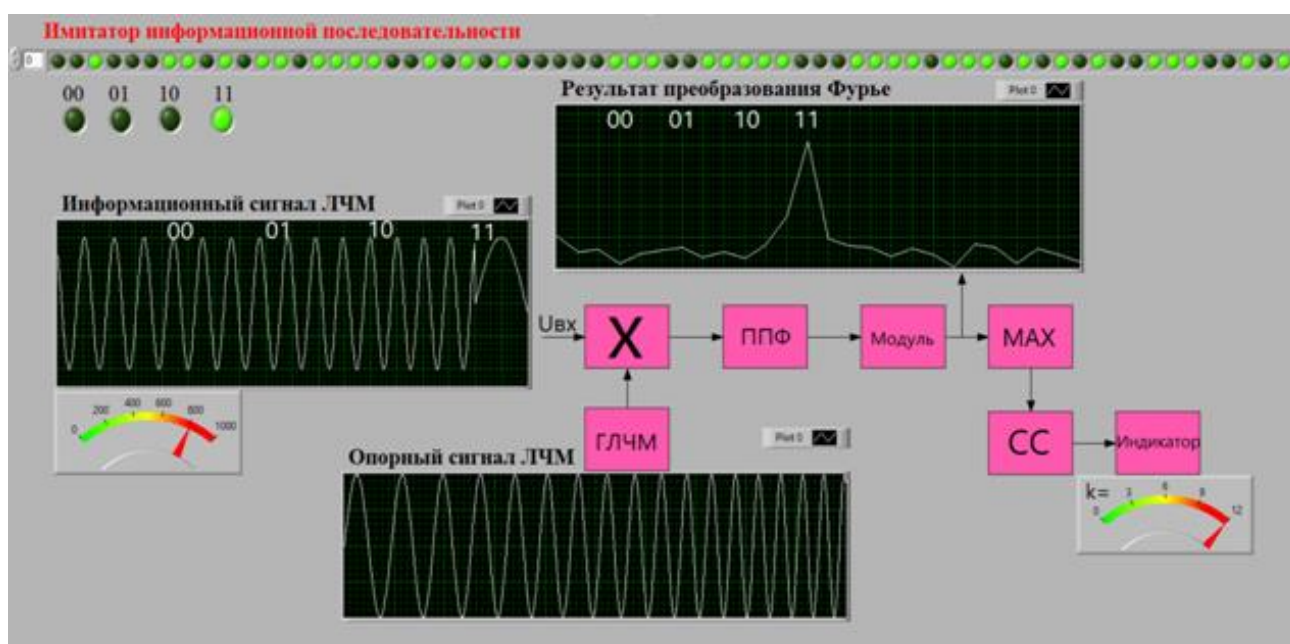


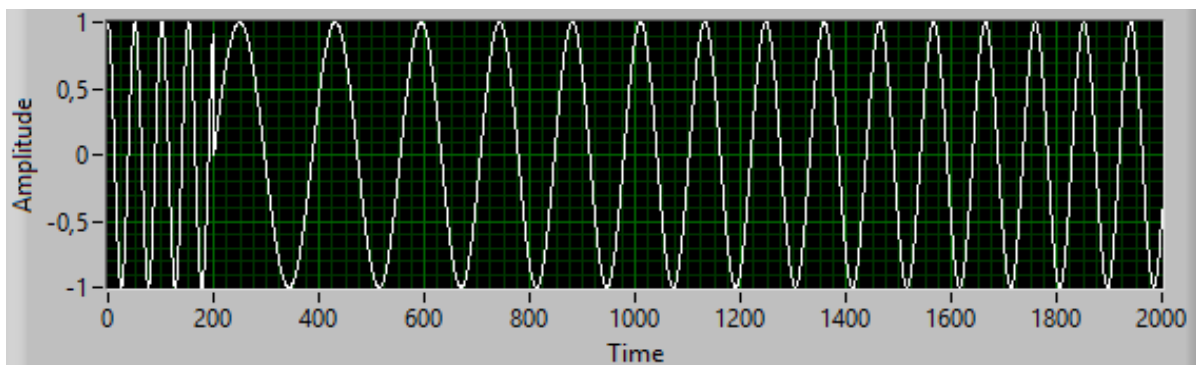
Рисунок 11 – Лицевая панель модели обработки сигнала LoRa

На лицевой панели (рис. 11) изображена структурная схема системы обработки сигнала LoRa, где:

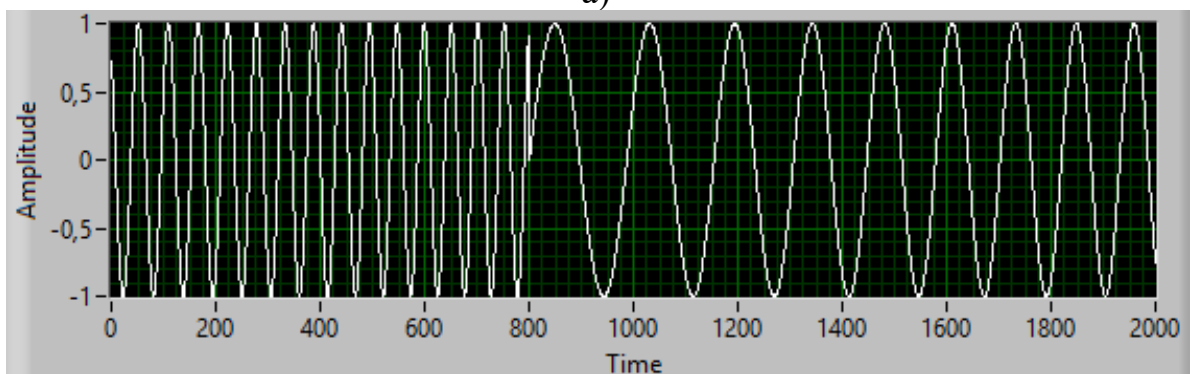
- ГЛЧМ – генератор ЛЧМ сигнала;
- перемножитель;
- ППФ – блок прямого преобразования Фурье;
- блок вычисления модуля;
- MAX – блок определения максимального значения сигнала и его положения на оси частот;
- СС – схема сравнения;
- индикатор.

В верхней части лицевой панели модели расположен массив логических значений, который формируется имитатором информационной последовательности. Сгенерированная случайная последовательность разбивается на дибиты, которые в процессе работы выводятся на лицевую панель

в виде значений «00», «01», «10», «11». В зависимости от того, как и в каком порядке появляются значения дибит, меняется коэффициент, определяющий количество тактов сдвига содержимого регистра. Таким способом производится кодирование информационной последовательности. Графики информационного сигнала для кодов «00» и «11» представлены на рисунке 12 и лицевой панели модели. Для символа «00» коэффициент, определяющий количество тактов сдвига содержимого регистра, равен 200, а для символа «11» – 800. На лицевой панели модели индикатор значения коэффициента расположен чуть ниже графика информационного сигнала. Его значение составляет 800 единиц, что соответствует передаваемому символу «11», что подтверждается подсвечиванием светодиодного индикатора «11».



а)



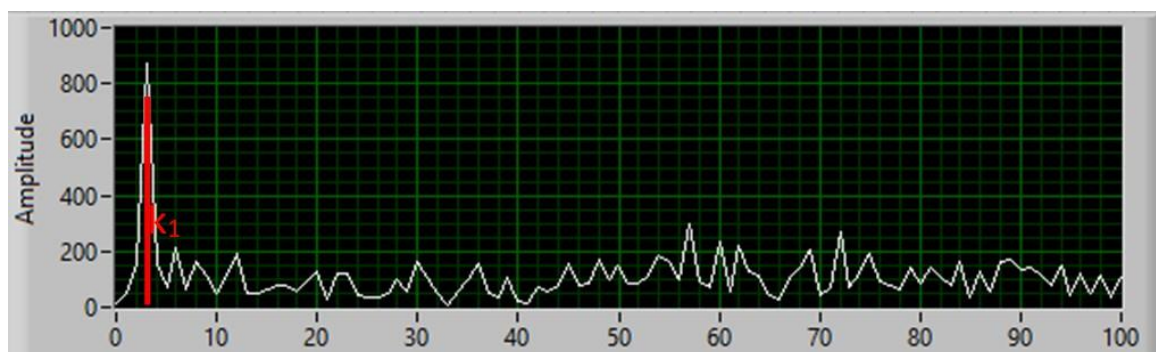
б)

Рисунок 12 – Информационный сигнал ЛЧМ: а) – для кода «00»;
б) – для кода «11»

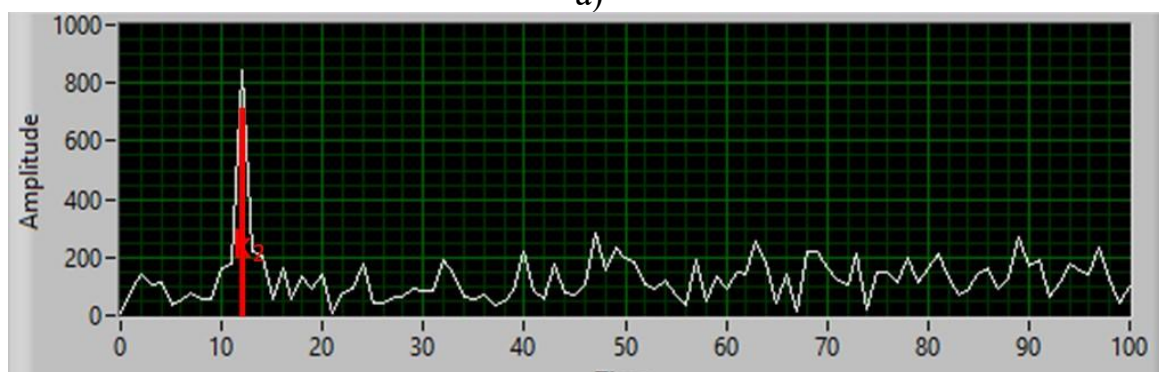
Способ приёма дибита «11», в виде упрощенной структурной схемы, представлен на лицевой панели модели. Входной информационный сигнал поступает на первый вход перемножителя, на второй вход которого подаётся опорное колебание с ГЛЧМ. Выходное напряжение перемножителя подается на блок прямого преобразования Фурье, модуль которого представляет собой пик спектральной функции. Расположение этого пика на горизонтальной оси и определяет соответствующий дибит. Блок MAX определяет максимальное значение пика сигнала и его положение на частотной оси. СС содержит в себе возможные значения положений пика сигнала. Следовательно, если есть совпадение положения принятого пика с эталонными значениями, то принимается решение о формировании соответствующего дибита. Стрелочный

индикатор на приёмной стороне показывает значения местоположения пиков сигнала на горизонтальной оси, которые соответствуют принятым дибитам. Значение индикатора, равное 12, соответствует принятому дибиту «11».

Ключевой особенностью радиointерфейса LoRa является его высокая помехоустойчивость [Попов и др., 2006]. На рисунке 13 представлена эффективность функционирования канала передачи данных на основе технологии LoRa в виде пиков спектральных функций, положение максимумов которых соответствует конкретному значению дибита в условиях воздействия помехи в виде аддитивного белого гауссовского шума.



а)



б)

Рисунок 13 – Пики спектральных функций: а) – для дибита «00»; б) – для дибита «11»)

Заключение

Таким образом, применение технологии LoRa позволит значительно увеличить надёжность, скрытность и достоверность передаваемой информации в системе МПСН за счёт применения шумоподобного сигнала на базе ЛЧМ. Это позволит предотвратить несанкционированный доступ к координатной информации воздушного судна, что приведёт к повышению безопасности полётов.

В работе был представлен анализ существующих видов ШПС и возможность их применения в канале передачи данных МПСН, а также реализован алгоритм обработки сигнала технологии LoRa в виде модели, позволяющей визуализировать процессы приёма и демодуляции сигнала LoRa для исследования эффективности передачи данных в различных условиях, а также вести подготовку высококвалифицированных инженерных кадров для

решения задач гражданской авиации.

Библиографический список

Антонова В. М. Преимущества применения технологии Lora / В. М. Антонова, Н. Е. Богомолова, Д. А. Руссак // Развитие современной науки: теоретические и прикладные аспекты: Сборник статей студентов, магистрантов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей / Под общей редакцией Т. М. Сигитова. Выпуск 19. Пермь: ИП Сигитов Т.М., 2017. С. 7-9. EDN ZGOWTN.

Ватрич А. Д. Радиопередающий модуль системы связи на основе технологии LoRa / А. Д. Ватрич, Г. О. Оплемах, В. М. Иськив // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2021. № 4. С. 76-81. EDN NEZBLI.

Верхулевский К. Технология LoRa в вопросах и ответах / К. Верхулевский // Беспроводные технологии. 2016. № 1(42). С. 18-21. EDN VOMQGP.

Ерохин В. В. Автоматизированный программно-аппаратный комплекс в среде LabVIEW для исследования эффективности подавления ПЭМИН / В. В. Ерохин, Е. В. Зайнулин // Вестник научных конференций. 2021. № 5-2(69). С. 23-24. EDN SPKRAV.

Ерохин В. В. Экспериментальная установка для исследования приёмников спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS на основе программно-аппаратного комплекса national instruments // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: Сборник тезисов докладов участников Международной научно-технической конференции, посвященной 45-летию Университета, Москва, 18–20 мая 2016 года. М.: Академия имени Н.Е. Жуковского, 2016. С. 188-189. EDN XBAOXX.

Исследование возможности применения технологии LoRa при проектировании систем позиционирования / К. Р. Каримова, Ю. М. Киреева, И. Р. Юмадилова, Г. И. Маснабиева // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2019): Труды VII Всероссийской научной конференции (с приглашением зарубежных ученых): в 3 томах, Уфа, 28–30 мая 2019 года. Том 2. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2019. С. 75-82. EDN ZGJIQS.

Кирюшкин В. В. Определение координат воздушного судна в полуактивной системе мультilaterации с синхронизацией приёмных позиций по запросному сигналу / В. В. Кирюшкин, Н. С. Волков, А. М. Медведев // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. В 6-ти томах, Воронеж, 16–18 апреля 2019 года. Том 4. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2019. С. 46-54. EDN UZJGLF.

Марычев Д. С. Оценка параметров ЛЧМ сигналов методом цифровой адаптивной фильтрации / Д. С. Марычев, О. А. Морозов, С. Л. Хмелев // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 3. С. 2-14. EDN OXWBSL.

Попов В. Тенденции развития систем передачи данных при использовании БЛА / В. Попов, Д. Федутдинов // Зарубежное военное обозрение. 2006. №4. С. 47-52.

Саджид А. Ю. О помехозащищенности широкополосных шумоподобных ЛЧМ ФМ и ПС ЛЧМ сигналов / А. Ю. Саджид, А. Н. Устинов // Научные исследования молодых учёных: сборник статей XVI Международной научно-практической конференции, Пенза, 17 января 2022 года. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2022. С. 74-82. EDN CUVJMD.

Применение технологии LoRa в беспилотных авиационных системах / М. А. Межетов, А. И. Тихова, У. С. Вахрушева, А. В. Федоров // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Иркутск, 14–15 октября 2021 года. Том 2. Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», 2021. С. 180-185. EDN UZUCLT.

Сенин А. И. Корреляционные свойства последовательностей, построенных на основе M-последовательностей и последовательностей Уолша // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение.

2014. № 5(98). С. 88-97. EDN SVZLSV.

Сенявин М. М. Обобщения кодов Баркера / М. М. Сенявин // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем: сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции, г. Москва, Россия, 13–17 ноября 2017 года / Московский технологический университет (МИРЭА). Часть 1. Москва: Московский технологический университет (МИРЭА), 2017. С. 134-136. EDN YNRJTB.

Скрыпник О. Н. Оптимизация траектории мобильного псевдоспутника для повышения точности интегрированного навигационно-временного поля ГЛОНАСС / О. Н. Скрыпник, Р. О. Арефьев // Современные наукоёмкие технологии. 2020. № 2. С. 51-58. DOI 10.17513/snt.37914. EDN KZCVNA.

Тележкин В. Ф. Исследование статистических характеристик ошибки определения местоположения для различных алгоритмов в системах мультilaterации / В. Ф. Тележкин, Р. Б. Рюмин // DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2012. Т. 2. № 2. С. 251-252. EDN ZHJIBT.

Турицев С. В. Программная реализация алгоритма кодирования и декодирования местоположения ВС в дискретно-адресном режиме вторичной радиолокации / С. В. Турицев, М. С. Турицева // Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции посвященной празднованию 100-летия конструкторского бюро «Туполев», 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 75-летия Иркутского авиационного технического колледжа, Иркутск, 13–14 октября 2022 года. Том 2. Иркутск: Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», 2022. С. 115-121. EDN YGUUUU.

References

Antonova V. M., Bogomolova N. E., Rusak D. A. (2017). Advantages of using LoRa technology. *Razvitie sovremennoj nauki: teoreticheskie i prikladnye aspekty: Sbornik statej studentov, magistrantov, aspirantov, molodyh uchenyh i prepodavatelej*. 19: 7-9. EDN ZGOWTN. [in Russian]

Erokhin V. V. (2016) Experimental installation for the study of GLONASS/GPS satellite navigation receivers based on the national instruments software and hardware complex. *Grazhdanskaya aviaciya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: Sbornik tezisov докладов uchastnikov Mezhdunarodnoj -nauchno-tekhnichejskoj konferencii, posvyashchennoj 45-letiyu Universiteta, Moskva, 18–20 maya 2016 goda*. Moscow: Akademiya imeni N.E. Zhukovskogo. 188-189. EDN XBAOXX. [in Russian]

Erokhin, V. V., Zainullin, E. V. (2021). Automated hardware and software complex in LabVIEW environment to study the effectiveness of PEMIN suppression. *Vestnik nauchnyh konferencij*. 5-2(69): 23-24. EDN SPKRAV. [in Russian]

Karimova, K. R., Kireeva, Y. M., Yumadilova, I. R., Masnabieva G. I. (2019). Investigation of the possibility of using LoRa technology in the design of positioning systems. *Informacionnye tekhnologii intellektual'noj podderzhki prinyatiya reshenij (ITIDS'2019): Trudy VII Vserossijskoj nauchnoj konferencii (s priglasheniem zarubezhnyh uchenyh): v 3 tomah, Ufa, 28–30 maya 2019 goda*. Ufa: Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tekhnicheskij universitet. 2: 75-82. EDN ZGJIQS. [in Russian]

Kiryushkin, V. V., Volkov, N. S., Medvedev, A.M. (2019). Determination of aircraft coordinates in a semi-active multilateration system with synchronization of receiving positions by request signal. *Radiolokaciya, navigaciya, svyaz': Sbornik trudov XXV Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnichejskoj konferencii, posvyashchennoj 160-letiyu so dnya rozhdeniya A.S. Popova. V 6-ti tomah, Voronezh, 16–18 aprelya 2019 goda*. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj universitet. 4: 46-54. EDN UZJGLF. [in Russian]

Marychev, D. S., Morozov, O. A., Khmelev, S. L. (2012). Estimation of LFM signal parameters by digital adaptive filtering. *ZHurnal radioelektroniki*. 3: 2-14. EDN OXWBSL. [in Russian]

- Mezhetov, M. A., Tikhova, A. I., Vakhrusheva, U. S., Fedorov, A.V. (2021). Application of LoRa technology in unmanned aircraft systems. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoj aviacii: sbornik trudov X Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Irkutsk, 14–15 oktyabrya 2021 goda*. Irkutsk: Irkutskij filial federal'nogo gosudarstvennogo byudzhetnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya «Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet grazhdanskoj aviacii». 2: 180-185. EDN UZUCLT. [in Russian]
- Popov, V., Fedutdinov, D. (2006). Trends in the development of data transmission systems using UAVs. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*. 4: 47-52. [in Russian]
- Sadjid, A. Yu., Ustinov, A. N. (2022). On noise immunity of broadband noise-like LFM FM and PS LFM signals. *Nauchnye issledovaniya molodyh uchyonyh: sbornik statej XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Penza, 17 yanvarya 2022 goda*. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G.YU.): 74-82. EDN CUVJMD. [in Russian]
- Senin A. I. (2014). Correlation properties of sequences constructed on the basis of m-sequences and Walsh sequences. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Priborostroenie*. 5(98): 88-97. EDN SVZLSV. [in Russian]
- Senyavin M. M. (2017). Generalizations of Barker codes. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya radiotekhnicheskikh i infokommunikacionnyh sistem: sbornik nauchnyh trudov III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, G. MOSKVA, ROSSIYA, 13–17 noyabrya 2017 goda / Moskovskij tekhnologicheskij universitet (MIREA)*. CHast' 1. Moscow: Moskovskij tekhnologicheskij universitet (MIREA): 134-136. EDN YNRJTB. [in Russian]
- Skrypnik O. N., Arefyev R. O. (2020). Optimization of the trajectory of a mobile pseudo-satellite to improve the accuracy of the integrated GLONASS navigation-time field. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2: 51-58. DOI 10.17513/snt.37914.EDN KZCVNA. [in Russian]
- Telezhkin V. F., Ryumin R. B. (2012). Investigation of the statistical characteristics of the location error for various algorithms in multilateration systems. *DSPA: Voprosy primeneniya cifrovoj obrabotki signalov*. 2(2): 251-252. EDN ZHJIBT. [in Russian]
- Turintsev S. V., Turintseva M. S. (2022). Software implementation of the algorithm for encoding and decoding the location of aircraft in the discrete-address mode of secondary radar. *Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoj aviacii: Sbornik trudov XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii posvyashchennoj prazdnovaniyu 100-letiya konstruktorskogo byuro "Tupolev", 55-letiya Irkutskogo filiala MGTU GA, 75-letiya Irkutskogo aviacionnogo tekhnicheskogo kolledzha, Irkutsk, 13–14 oktyabrya 2022 goda*. Irkutsk: Irkutskij filial federal'nogo gosudarstvennogo byudzhetnogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet grazhdanskoj aviacii". 2: 115-121. EDN YGUUUY. [in Russian]
- Vatrich A.D., Oplemakh G. O., Iskiv V. M. (2021). Radio transmission module of the communication system based on LoRa technology. *Sovremennye problemy radioelektroniki i telekommunikacij*. 4: 76-81. EDN NEZBLI. [in Russian]
- Verkhulevsky K. (2016). LoRa technology in questions and answers. *Besprovodnye tekhnologii*. 1(42): 18-21. EDN VOMQGP. [in Russian]