Исследование хаотических широкополосных сигналов в контексте задач гидроакустики

**Человек:** Наиболее распространенным типом зондирующих сигналов гидролокационных систем являются широкополосные линейно-частотно-модулированные сигналы (ЛЧМ). За счет применения подобных сигналов удается повысить дальность и разрешающую способность гидроакустических приборов, однако это не решает проблему взаимной интерференции импульсов. Одним из видов широкополосных сигналов являются хаотические колебания, которые теоретически способны стать альтернативой ЛЧМ-сигналам за счет повышенной устойчивости к перекрестным помехам. В работе проведен сравнительный анализ хаотических и ЛЧМ-сигналов путем имитационного моделирования их прохождения в водной среде. Исследованы хаотические сигналы, порождаемые системами с различным числом бассейнов притяжения. Исследование показывает, что хаотические сигналы более устойчивы к взаимной интерференции, а также испытывают меньшее затухание при распространении в водной среде по сравнению с применяемыми сегодня типами сигналов. Устойчивость хаотических широкополосных сигналов к интерференции и затуханию коррелирует с числом бассейнов притяжения аттрактора порождающей хаотической системы. По результатам работы можно сделать вывод о применимости хаотических сигналов в качестве зондирующих импульсов гидролокационных систем.

**Key words:** широкополосный сигнал, динамический хаос, хаотическая система, гидроакустика, иммитационное моделирование, взаимная интерференция сигналов, активный гидролакатор, линейно-частотная модуляция, бассейн притяжения, корреляционный анализ

=================================

**FastText\_KMeans\_Clean:** Исходя из предположения Хармана о том, что хаотические зондирующие сигналы могут улучшить многие параметры гидролокаторов, в настоящей работе проводится исследование влияния водной среды, шума и перекрестных помех на характеристики сонара при использовании различных типов сигналов. `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-xy):} ` (4). `f(x)=sum\_(j=-N)^M(-1)^(j-1)tanh(k(x-2j))` (6). Рис. 6 – Спектры хаотических и ЛЧМ-сигналов, отмасштабированные для применения в гидролокаторе с центральной частотой 70 кГц.

**Key words part:** 0.4137931034482759

=================================

**FastText\_KMeans\_Raw/:** Исходя из предположения Хармана о том, что хаотические зондирующие сигналы могут улучшить многие параметры гидролокаторов, в настоящей работе проводится исследование влияния водной среды, шума и перекрестных помех на характеристики сонара при использовании различных типов сигналов. `TL=10klog\_(10)R+alpha(R)/(1000) (dB) (1)`. Более сложные выражения учитывают не только частоту f , но также давление, кислотность, температуру и соленость. `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-xy):} ` (4). Где x0=0.7290, y0=0.9814, z0=0.1978;. `((dotx),(doty),(dotz))=((0,1,0),(0,0,1),(0,-a,-a))\*((x),(y),(z))+((0),(0),(-a\*f(x)))`. `f(x)=sum\_(j=-N)^M(-1)^(j-1)tanh(k(x-2j))` (6). Рис. 6 – Спектры хаотических и ЛЧМ-сигналов, отмасштабированные для применения в гидролокаторе с центральной частотой 70 кГц.

**Key words part:** 0.4137931034482759

=================================

**FastText\_PageRank\_Clean/:** ` alpha=(0.1f^(2))/(1+f^(2))+(40f^(2))/(4100+f^(2))+2.75\*10^(-4)f^(2)+0.003 ((dB)/(km)) (2)`. `M(f)=(1000)/(alpha(f)R) (dB)` (3). `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-xy):} ` (4). Где x0=0.7290, y0=0.9814, z0=0.1978;. `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-x^(2)):} ` (5). `((dotx),(doty),(dotz))=((0,1,0),(0,0,1),(0,-a,-a))\*((x),(y),(z))+((0),(0),(-a\*f(x)))`. `f(x)=sum\_(j=-N)^M(-1)^(j-1)tanh(k(x-2j))` (6). `{(dotx=(1)/(2(x^(2)+y^(2)))[-ax^(3)+(2a+c-z)x^(2)y+(a-2)xy^(2)-(c-z)y^(3)]),(doty=(1)/(2(x^(2)+y^(2)))[(c-z)x^(3)+(a-2)x^(2)y+(-2a-c-z)xy^(2)-ay^(3)]), (dotz=2x^(3)y-2xy^(3)-bz):} (7)`.

**Key words part:** 0.3103448275862069

=================================

**FastText\_PageRank\_Raw/:** `TL=10klog\_(10)R+alpha(R)/(1000) (dB) (1)`. ` alpha=(0.1f^(2))/(1+f^(2))+(40f^(2))/(4100+f^(2))+2.75\*10^(-4)f^(2)+0.003 ((dB)/(km)) (2)`. `M(f)=(1000)/(alpha(f)R) (dB)` (3). `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-xy):} ` (4). `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-x^(2)):} ` (5). `((dotx),(doty),(dotz))=((0,1,0),(0,0,1),(0,-a,-a))\*((x),(y),(z))+((0),(0),(-a\*f(x)))`. `f(x)=sum\_(j=-N)^M(-1)^(j-1)tanh(k(x-2j))` (6). `{(dotx=(1)/(2(x^(2)+y^(2)))[-ax^(3)+(2a+c-z)x^(2)y+(a-2)xy^(2)-(c-z)y^(3)]),(doty=(1)/(2(x^(2)+y^(2)))[(c-z)x^(3)+(a-2)x^(2)y+(-2a-c-z)xy^(2)-ay^(3)]), (dotz=2x^(3)y-2xy^(3)-bz):} (7)`.

**Key words part:** 0.3103448275862069

=================================

**Mixed\_ML\_TR/:** Исходя из предположения Хармана о том, что хаотические зондирующие сигналы могут улучшить многие параметры гидролокаторов, в настоящей работе проводится исследование влияния водной среды, шума и перекрестных помех на характеристики сонара при использовании различных типов сигналов. Проводится сравнительный анализ хаотических и ЛЧМ-сигналов в моделях водной среды и гидроакустического тракта. Аппроксимация АЧХ с помощью линейного фильтра позволяет выполнять не только частотный, но и временной анализ сигналов, что соответствует задачам данного исследования. Где x0=-3.405, y0=1.456, z0=-0.4517. . Рис. 4 – Аттрактор обобщенной системы Чуа с четырьмя бассейнами притяжения. На рис. 7 приведен график подобного сигнала в сравнении с выходными сигналами описанных выше хаотических систем, а также обычный ЛЧМ-сигнал. Было исследовано прохождение полученных сигналов через модель зашумленной среды, соответствующую расстояниям в 100 и 1000 м. Тем не менее, даже в случае ограниченной полосы частот хаотические сигналы сохраняют еще одно полезное свойство — ортогональность, имеющее ключевое значение при устранении перекрестной помехи. В качестве помех выступают хаотические сигналы систем Спротта D, E, G и H. . Рис. 15 – Анализ тестируемых сигналов с различным количеством сигналов-помех в канале, при этом 50% помех являются ЛЧМ-гармониками с различными параметрами, а 50% — хаотическими сигналами систем Спротта.

**Key words part:** 0.5517241379310345

=================================

**MultiLingual\_KMeans/:** Проводится сравнительный анализ хаотических и ЛЧМ-сигналов в моделях водной среды и гидроакустического тракта. Аппроксимация АЧХ с помощью линейного фильтра позволяет выполнять не только частотный, но и временной анализ сигналов, что соответствует задачам данного исследования. Где x0=-3.405, y0=1.456, z0=-0.4517. . Рис. 4 – Аттрактор обобщенной системы Чуа с четырьмя бассейнами притяжения. Было исследовано прохождение полученных сигналов через модель зашумленной среды, соответствующую расстояниям в 100 и 1000 м. Тем не менее, даже в случае ограниченной полосы частот хаотические сигналы сохраняют еще одно полезное свойство — ортогональность, имеющее ключевое значение при устранении перекрестной помехи.

**Key words part:** 0.5517241379310345

=================================

**Multilingual\_PageRank/:** Позднее Харман и др. Работа имеет следующую структуру. Чаще всего указывается полоса от 500 Гц до 1500 кГц [15]. Формула Фишера и Симмонса является наиболее точной из представленных [9], но является арифметически сложной и избыточна в рамках настоящего исследования. Где x0=0.7290, y0=0.9814, z0=0.1978;. Где x 0=0.4079, y 0=0.7376, z0=0.4545;. Где x0=1.287, y0=-4.182, z0=41,42. Это предположение было проверено в серии вычислительных экспериментов, результаты которых приведены на рис. 14 и 15.

**Key words part:** 0.3103448275862069

=================================

**RuBERT\_KMeans\_Without\_ST/:** `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-x^(2)):} ` (5). Центральная частота полученных спектров составляет около 70 кГц, что приемлемо для сонаров среднего и дальнего действия, применяемых при мониторинге акваторий на дистанциях порядка 100‑1000 м [14]. Рис. 6 – Спектры хаотических и ЛЧМ-сигналов, отмасштабированные для применения в гидролокаторе с центральной частотой 70 кГц. В качестве помех выступают хаотические сигналы систем Спротта D, E, G и H. . Рис. 15 – Анализ тестируемых сигналов с различным количеством сигналов-помех в канале, при этом 50% помех являются ЛЧМ-гармониками с различными параметрами, а 50% — хаотическими сигналами систем Спротта.

**Key words part:** 0.4827586206896552

=================================

**RuBERT\_KMeans\_With\_ST/:** Рис. 2 – Сравнение моделей поглощения (a) и АЧХ водной среды согласно формуле Фишера и Симмонса (б) при аппроксимации откликов фильтров на различных расстояниях от источника. `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-x^(2)):} ` (5). Также в ряде работ описаны сверхширокополосные ЛЧМ-зондирующие сигналы, девиация частоты которых сравнима со значением центральной частоты [15]. Было исследовано прохождение полученных сигналов через модель зашумленной среды, соответствующую расстояниям в 100 и 1000 м.

**Key words part:** 0.3793103448275862

=================================

**RUBERT\_page\_rank\_Without\_ST/:** Позднее Харман и др. Чаще всего указывается полоса от 500 Гц до 1500 кГц [15]. Первый из них это пространственное затухание, связанное с геометрией распространения волн. Возмущения на частотах в диапазоне от 100 Гц до 100 кГц порождаются ветровыми волнами. Однако зондирующие сигналы можно кодировать не только с помощью модуляции гармоник, но и непосредственно через задание формы аналогового сигнала.

**Key words part:** 0.4137931034482759

=================================

**RUBERT\_page\_rank\_With\_ST/:** Позднее Харман и др. Работа имеет следующую структуру. `{(dotx=(1)/(2(x^(2)+y^(2)))[-ax^(3)+(2a+c-z)x^(2)y+(a-2)xy^(2)-(c-z)y^(3)]),(doty=(1)/(2(x^(2)+y^(2)))[(c-z)x^(3)+(a-2)x^(2)y+(-2a-c-z)xy^(2)-ay^(3)]), (dotz=2x^(3)y-2xy^(3)-bz):} (7)`. Наилучшие результаты показали системы с большим числом бассейнов притяжения — система прото-Лоренц и обобщенный генератор Чуа. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект "Теория и средства проектирования цифровых генераторов хаотических сигналов" (Договор № 17-07-0086217 от 10.04.2017).

**Key words part:** 0.5172413793103449

=================================

**RUSBERT\_KMeans\_Without\_ST/:** Другой причиной затухания звука является поглощение энергии, связанное с вязкостью воды и явлением ионной релаксации [7]. `M(f)=(1000)/(alpha(f)R) (dB)` (3). Данные типы шумов при моделировании могут быть сымитированы широкополосным белым шумом низкой интенсивности. Рис. 13 – Перекрестная помеха при работе многолучевого эхолота: a) нормальное функционирование, сигнал A, посланный раньше сигнала B, отразился от дна раньше и был принят прежде сигнала B; b) перекрестная помеха, сигнал A излучен раньше сигнала B, но сигнал B был принят первым и отождествлен с сигналом A. Для решения проблемы перекрестных помех существуют различные программные и аппаратные методы (напр., алгоритмы EERUF [10] и ROSUM [11]), включая специальные техники кодирования гармонических сигналов.

**Key words part:** 0.4482758620689655

=================================

**RUSBERT\_KMeans\_With\_ST/:** Рис. 1 – Модель канала тракта гидролокатора. Другой причиной затухания звука является поглощение энергии, связанное с вязкостью воды и явлением ионной релаксации [7]. Здесь R — расстояние в метрах, α — коэффициент поглощения в дБ/км, k = 1 для цилиндрического типа распространения и k = 2 для сферического. Пространственное затухание слабо зависит от частоты сигнала, в отличие от поглощения. `f(x)=sum\_(j=-N)^M(-1)^(j-1)tanh(k(x-2j))` (6). Также в ряде работ описаны сверхширокополосные ЛЧМ-зондирующие сигналы, девиация частоты которых сравнима со значением центральной частоты [15]. Результаты эксперимента свидетельствуют о существенной роли ширины полосы используемых частот в системах гидролокации, использующих хаотические сигналы.

**Key words part:** 0.4482758620689655

=================================

**RUSBERT\_page\_rank\_Without\_ST/:** Работа имеет следующую структуру. `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-xy):} ` (4). Где x0=0.7290, y0=0.9814, z0=0.1978;. `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-x^(2)):} ` (5). `((dotx),(doty),(dotz))=((0,1,0),(0,0,1),(0,-a,-a))\*((x),(y),(z))+((0),(0),(-a\*f(x)))`.

**Key words part:** 0.3103448275862069

=================================

**RUSBERT\_page\_rank\_With\_ST/:** Работа имеет следующую структуру. `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-xy):} ` (4). `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-x^(2)):} ` (5). `((dotx),(doty),(dotz))=((0,1,0),(0,0,1),(0,-a,-a))\*((x),(y),(z))+((0),(0),(-a\*f(x)))`. `{(dotx=(1)/(2(x^(2)+y^(2)))[-ax^(3)+(2a+c-z)x^(2)y+(a-2)xy^(2)-(c-z)y^(3)]),(doty=(1)/(2(x^(2)+y^(2)))[(c-z)x^(3)+(a-2)x^(2)y+(-2a-c-z)xy^(2)-ay^(3)]), (dotz=2x^(3)y-2xy^(3)-bz):} (7)`.

**Key words part:** 0.3103448275862069

=================================

**Simple\_PageRank/:** [3], рассмотрев системы Лоренца и Дуффинга, пришли к заключению, что хаотические импульсы обладают всеми необходимыми для зондирующих сигналов свойствами. Амплитудно-частотные характеристики моделей среды, соответствующих разным расстояниям прохождения сигнала, показаны на рис. 2 (б). Центральная частота полученных спектров составляет около 70 кГц, что приемлемо для сонаров среднего и дальнего действия, применяемых при мониторинге акваторий на дистанциях порядка 100‑1000 м [14]. Рис. 6 – Спектры хаотических и ЛЧМ-сигналов, отмасштабированные для применения в гидролокаторе с центральной частотой 70 кГц. Проблема перекрестных помех заключается в том, что в ряде случаев импульсы с различных циклов сканирования или датчиков могут смешиваться (рис. 13), что приводит к артефактам изображения или ошибкам определения дальности. Рис. 13 – Перекрестная помеха при работе многолучевого эхолота: a) нормальное функционирование, сигнал A, посланный раньше сигнала B, отразился от дна раньше и был принят прежде сигнала B; b) перекрестная помеха, сигнал A излучен раньше сигнала B, но сигнал B был принят первым и отождествлен с сигналом A. Для решения проблемы перекрестных помех существуют различные программные и аппаратные методы (напр., алгоритмы EERUF [10] и ROSUM [11]), включая специальные техники кодирования гармонических сигналов.

**Key words part:** 0.4482758620689655

=================================

**TextRank/:** Исходя из предположения Хармана о том, что хаотические зондирующие сигналы могут улучшить многие параметры гидролокаторов, в настоящей работе проводится исследование влияния водной среды, шума и перекрестных помех на характеристики сонара при использовании различных типов сигналов. На рис. 7 приведен график подобного сигнала в сравнении с выходными сигналами описанных выше хаотических систем, а также обычный ЛЧМ-сигнал. Рис. 7 – Вид хаотических сигналов, порождаемых системами (1-6), и ЛЧМ-гармоник во временной области. Анализ результатов моделирования (рис. 8) показывает, что с увеличением расстояния хаотические сигналы оказываются менее подверженными поглощению за счет наличия низкочастотных гармоник в спектре. В качестве помех выступают хаотические сигналы систем Спротта D, E, G и H. . Рис. 15 – Анализ тестируемых сигналов с различным количеством сигналов-помех в канале, при этом 50% помех являются ЛЧМ-гармониками с различными параметрами, а 50% — хаотическими сигналами систем Спротта. Дальнейшими направлениями работы будут являться теоретический и экспериментальный анализ свойств хаотических сигналов, а также сопоставление аналитических метрик сигналов, результатов вычислительных экспериментов и данных натурных экспериментов по прохождению хаотических сигналов в водной среде.

**Key words part:** 0.5172413793103449

=================================

**TF-IDF\_KMeans/:** В случае, когда поверхность воды и дно существенно удалены от источника, звуковые волны распространяются в форме расширяющейся сферы (сферическое распространение). `M(f)=(1000)/(alpha(f)R) (dB)` (3). `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-xy):} ` (4). Где x0=0.7290, y0=0.9814, z0=0.1978;. Исходя из этого, сверхширокополосным можно назвать ЛЧМ-сигнал, частота которого изменяется от 35 до 105 кГц. Рис. 9 – Зависимость погрешности распознавания сигнала от соотношения сигнал/шум на расстоянии 100 м. Однако зондирующие сигналы можно кодировать не только с помощью модуляции гармоник, но и непосредственно через задание формы аналогового сигнала. Анализируя результаты экспериментов, можно заключить, что сигналы системы прото-Лоренц и обобщенной системы Чуа демонстрируют на порядок лучшую различимость по сравнению с сигналом системы Спротта B и ЛЧМ-гармониками.

**Key words part:** 0.4482758620689655

=================================

**Текст:** Идея использования хаотических последовательностей в роли зондирующих сигналов гидролокаторов привлекает внимание исследователей с 1990-х годов. Ранние работы показали теоретическую применимость данного типа сигналов в задачах гидроакустики. Алапати и др. [3], рассмотрев системы Лоренца и Дуффинга, пришли к заключению, что хаотические импульсы обладают всеми необходимыми для зондирующих сигналов свойствами. Авторы отмечают, что, в отличие от псевдослучайных шумов, хаотические сигналы могут быть предварительно обработаны с использованием тех же методов, что и тональные или ЛЧМ-сигналы. Позднее Харман и др. [4] выделили ряд преимуществ хаотических сигналов, таких, как энергетическая и спектральная эффективность, возможность маскировки факта применения активного сонара и одновременно с этим простота идентификации импульсов. Хаотические сигналы также успешно применяются в технических системах при фазовой и частотной модуляции гармонических сигналов [5].. Исходя из предположения Хармана о том, что хаотические зондирующие сигналы могут улучшить многие параметры гидролокаторов, в настоящей работе проводится исследование влияния водной среды, шума и перекрестных помех на характеристики сонара при использовании различных типов сигналов. Проводится сравнительный анализ хаотических и ЛЧМ-сигналов в моделях водной среды и гидроакустического тракта. Работа имеет следующую структуру. В разделе 1 описаны модели гидроакустического тракта и водной среды. Раздел 2 посвящен анализу различимости хаотических сигналов при их взаимной интерференции. В разделе 3 сравнивается влияние шумов и эффектов затухания на хаотические и ЛЧМ-сигналы в модели гидроакустического канала. В заключении сделаны выводы о применимости хаотических сигналов в качестве зондирующих сигналов гидролокаторов.. Упрощенная структура канала активного гидролокатора представлена на рис. 1. Канал состоит из генератора, излучателя, гидрофона (иногда два последних конструктивно представляют собой одно устройство — трансдьюсер) и блока анализа. Одним из наиболее эффективных способов выделения отраженного сигнала из фонового шума является применение функции взаимной корреляции.. Современные гидроакустические преобразователи имеют приблизительно равномерную частотную характеристику в широком диапазоне частот. Чаще всего указывается полоса от 500 Гц до 1500 кГц [15]. Этого вполне достаточно для работы со сверхширокополосными сигналами, в т.ч. и хаотическими. В рассматриваемой ниже модели предполагается, что преобразователи не оказывают существенного влияния на форму излучаемого и принимаемого сигналов.. . Рис. 1 – Модель канала тракта гидролокатора. В литературе, как правило, рассматривается два основных механизма ослабления звука при распространении в водной среде [6]. Первый из них это пространственное затухание, связанное с геометрией распространения волн. Конечная энергия волны, излучаемой источником, распределяется в пространстве по логарифмическому закону по мере ее движения. В случае, когда поверхность воды и дно существенно удалены от источника, звуковые волны распространяются в форме расширяющейся сферы (сферическое распространение). В случае, когда поверхность и дно образуют канал, в нем происходит цилиндрическое распространение волны. Чисто сферический тип распространения возможен только на очень глубоководных участках, а на мелководье преобладает цилиндрическое распространение [6]. Возможен и промежуточный случай, когда волна распространяется сферически, но меняет тип распространения на цилиндрический при встрече с поверхностью и/или дном акватории. Другой причиной затухания звука является поглощение энергии, связанное с вязкостью воды и явлением ионной релаксации [7]. При этом акустическая энергия преобразуется в тепло из-за трения молекул воды друг о друга. Ионная релаксация наблюдается у молекул сульфата магния MgSO4 и борной кислоты B(OH)3, растворенных в морской воде в зависимом от давления химическом равновесии. Распространение акустической волны изменяет давление, что запускает или останавливает реакцию разъединения ионов в соответствии с принципом Ле Шателье. Ионная релаксация ослабляет волну, потребляя энергию акустических колебаний.. Потери, вызванные ослаблением и поглощением, могут быть выражены следующей формулой [8]:. `TL=10klog\_(10)R+alpha(R)/(1000) (dB) (1)`. Здесь R — расстояние в метрах, α — коэффициент поглощения в дБ/км, k = 1 для цилиндрического типа распространения и k = 2 для сферического. Пространственное затухание слабо зависит от частоты сигнала, в отличие от поглощения. Простейшее приближение коэффициента поглощения можно получить с помощью формулы Тёрпа [8]:. ` alpha=(0.1f^(2))/(1+f^(2))+(40f^(2))/(4100+f^(2))+2.75\*10^(-4)f^(2)+0.003 ((dB)/(km)) (2)`. Более сложные выражения учитывают не только частоту f , но также давление, кислотность, температуру и соленость. Сравнение выражений коэффициентов поглощения для солености S = 35 ‰, температуры T = 4 ° C, давления P = 1 атм и кислотности pH = 8 приведены на рис. 2 (а). Формула Фишера и Симмонса является наиболее точной из представленных [9], но является арифметически сложной и избыточна в рамках настоящего исследования. АЧХ водной среды может быть найдена путем фиксации расстояния в выражении для TL : nguage:RU;mso-fareast-language:AR-SA;mso-bidi-language:AR-SA'>Потери, вызванные ослаблением и поглощением, могут быть выражены следующей формулой [8]:. `M(f)=(1000)/(alpha(f)R) (dB)` (3). Амплитудно-частотные характеристики моделей среды, соответствующих разным расстояниям прохождения сигнала, показаны на рис. 2 (б).. . Рис. 2 – Сравнение моделей поглощения (a) и АЧХ водной среды согласно формуле Фишера и Симмонса (б) при аппроксимации откликов фильтров на различных расстояниях от источника. Аппроксимация АЧХ с помощью линейного фильтра позволяет выполнять не только частотный, но и временной анализ сигналов, что соответствует задачам данного исследования.. Еще одним компонентом модели водной среды является блок аддитивного шума. Шумы в морской среде порождаются различными природными и антропогенными источниками: волнами, ветром, дождем, морской фауной, судами, гидролокаторами, промышленными работами, такими как дноуглубление и забивка свай, низколетящими самолетами и др. Большинство источников производят низкочастотный шум, которым можно пренебречь при исследовании ультразвуковых систем. Возмущения на частотах в диапазоне от 100 Гц до 100 кГц порождаются ветровыми волнами. На частотах свыше 100 кГц также присутствует тепловой шум [8]. Данные типы шумов при моделировании могут быть сымитированы широкополосным белым шумом низкой интенсивности.. Одним из способов генерации хаотических сигналов является численное решение систем дифференциальных уравнений, описывающих системы с динамическим хаосом. Данный подход позволяет изменять свойства генерируемого сигнала не только путем его модуляции, но и с помощью вариации параметров нелинейности системы. В контексте нашего исследования представляет интерес сравнение хаотических систем с различным количеством бассейнов притяжения аттрактора. В работе рассматриваются системы уравнений с двумя и четырьмя бассейнами притяжения в аттракторе.. `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-xy):} ` (4). Где x0=0.7290, y0=0.9814, z0=0.1978;. `{(dotx=yz),(doty=x-y),(dotz=1-x^(2)):} ` (5). Где x 0=0.4079, y 0=0.7376, z0=0.4545;. Аттракторы систем (4) и (5) показаны на рис. 3; они имеют по два бассейна притяжения.. Рис. 3 – Фазовые портреты систем Спротта B (а) и Спротта C C (б). 2. Обобщенная модель хаотической цепи Чуа с числом бассейнов притяжения, определяемым параметрами системы [17]. Выбрана комбинация параметров, дающая четыре завитка аттрактора: a= 0.25, M =3, N=3, k=2.. `((dotx),(doty),(dotz))=((0,1,0),(0,0,1),(0,-a,-a))\*((x),(y),(z))+((0),(0),(-a\*f(x)))`. `f(x)=sum\_(j=-N)^M(-1)^(j-1)tanh(k(x-2j))` (6). Где x0=-3.405, y0=1.456, z0=-0.4517. . Рис. 4 – Аттрактор обобщенной системы Чуа с четырьмя бассейнами притяжения. 3. Четырехзавитковая система прото-Лоренц [18] — обобщение системы Лоренца, демонстрирующей хаотическое поведение при значениях параметров:a=10, b=8/3, c=28 .. `{(dotx=(1)/(2(x^(2)+y^(2)))[-ax^(3)+(2a+c-z)x^(2)y+(a-2)xy^(2)-(c-z)y^(3)]),(doty=(1)/(2(x^(2)+y^(2)))[(c-z)x^(3)+(a-2)x^(2)y+(-2a-c-z)xy^(2)-ay^(3)]), (dotz=2x^(3)y-2xy^(3)-bz):} (7)`. Где x0=1.287, y0=-4.182, z0=41,42.. Фазовый портрет системы (7) приведен на рис.5.. Рис. 5 – Аттрактор системы прото-Лоренц (б). Исходные спектры переменных состояния рассматриваемых систем занимают полосу частот, далекую от типичных для гидроакустики значений. Выбрав частоту дискретизации равной 32 МГц при шаге интегрирования , можно получить сигналы со спектром, смещенным в область высоких частот (рис. 7). Аналогичным образом можно получить требуемые спектральные свойства и для оставшихся хаотических систем. Центральная частота полученных спектров составляет около 70 кГц, что приемлемо для сонаров среднего и дальнего действия, применяемых при мониторинге акваторий на дистанциях порядка 100‑1000 м [14]. Стандартные ЛЧМ-сигналы имеют девиацию частоты 10-20 кГц, при этом частота несущей гармоники изменяется в диапазоне от 60 до 80 кГц. Также в ряде работ описаны сверхширокополосные ЛЧМ-зондирующие сигналы, девиация частоты которых сравнима со значением центральной частоты [15]. Исходя из этого, сверхширокополосным можно назвать ЛЧМ-сигнал, частота которого изменяется от 35 до 105 кГц. На рис. 7 приведен график подобного сигнала в сравнении с выходными сигналами описанных выше хаотических систем, а также обычный ЛЧМ-сигнал.. . Рис. 6 – Спектры хаотических и ЛЧМ-сигналов, отмасштабированные для применения в гидролокаторе с центральной частотой 70 кГц.. . Рис. 7 – Вид хаотических сигналов, порождаемых системами (1-6), и ЛЧМ-гармоник во временной области. Было исследовано прохождение полученных сигналов через модель зашумленной среды, соответствующую расстояниям в 100 и 1000 м. Обнаружение сигнала на фоне шума осуществлялось методом кросс-корреляции. В качестве источника шумов использовался генератор белого шума.. Анализ результатов моделирования (рис. 8) показывает, что с увеличением расстояния хаотические сигналы оказываются менее подверженными поглощению за счет наличия низкочастотных гармоник в спектре.. . a) б). Рис. 8 – Временные диаграммы (а) и графики кросс-корреляции (б) для тестовых сигналов при прохождении расстояния в 1000 м. Подавление средой высокочастотных составляющих компенсируется за счет низкочастотной части спектра сигнала. . Порог различимости для хаотических зондирующих сигналов оказался, по меньшей мере, на порядок большим, чем для ЛЧМ-сигналов (рис. 9-11). При исследовании каждого из типов сигнала проводилась серия из ста экспериментов.. Наилучшие результаты показали системы с большим числом бассейнов притяжения — система прото-Лоренц и обобщенный генератор Чуа. Это может быть объяснено наличием большего числа низкочастотных составляющих в их спектре, т.к. не обладающая подобным свойством система Спротта В показывает наихудшие результаты из всех хаотических генераторов.. . Рис. 9 – Зависимость погрешности распознавания сигнала от соотношения сигнал/шум на расстоянии 100 м. . Рис. 10 – Зависимость погрешности распознавания сигналов методом кросс-корреляции от соотношения сигнал/шум на расстоянии 1000 м. . Рис. 11 – Среднее значение и максимумы сигналов после прохождения ими расстояния 1000 м в среде. Предыдущие эксперименты были поставлены исходя из предположения, что излучатель и приемник тракта позволяют передавать сигналы любой формы без существенных искажений. Рассмотрим случай, когда излучатель способен генерировать сигнал лишь в определенном диапазоне частот, адаптированном под использование сверхширокополосного ЛЧМ-сигнала. В этом случае спектры тестовых сигналов будут выглядеть так, как показано на рис. 12 (а). Результаты тестов на устойчивость к поглощению и шуму приведены на рис. 12 (б).. . а) б). Рис. 12 – Сравнение свойств хаотических и ЛЧМ-сигналов в случае ограниченной полосы пропускания тракта. При искусственном ограничении частотного диапазона хаотические сигналы демонстрируют несколько меньшее преимущество в распознаваемости. Результаты эксперимента свидетельствуют о существенной роли ширины полосы используемых частот в системах гидролокации, использующих хаотические сигналы. Тем не менее, даже в случае ограниченной полосы частот хаотические сигналы сохраняют еще одно полезное свойство — ортогональность, имеющее ключевое значение при устранении перекрестной помехи.. Проблема перекрестных помех заключается в том, что в ряде случаев импульсы с различных циклов сканирования или датчиков могут смешиваться (рис. 13), что приводит к артефактам изображения или ошибкам определения дальности. Это явление иногда называют взаимной интерференцией зондирующих сигналов.. . Рис. 13 – Перекрестная помеха при работе многолучевого эхолота: a) нормальное функционирование, сигнал A, посланный раньше сигнала B, отразился от дна раньше и был принят прежде сигнала B; b) перекрестная помеха, сигнал A излучен раньше сигнала B, но сигнал B был принят первым и отождествлен с сигналом A.. Для решения проблемы перекрестных помех существуют различные программные и аппаратные методы (напр., алгоритмы EERUF [10] и ROSUM [11]), включая специальные техники кодирования гармонических сигналов. Однако зондирующие сигналы можно кодировать не только с помощью модуляции гармоник, но и непосредственно через задание формы аналогового сигнала. В частности, можно предположить, что хаотические сигналы, обладающие индивидуальной формой во временной области, должны быть слабо подвержены влиянию перекрестных помех. Это предположение было проверено в серии вычислительных экспериментов, результаты которых приведены на рис. 14 и 15. Постановка экспериментов предполагала подмешивание в модельный канал до 20 сигналов-помех. В качестве помех выступили сигналы, порождаемые системами Спротта D, E, G и H [12] (рис. 14), а также ЛЧМ-гармоники со случайными параметрами. Сравнение показывает значимость выбора зондирующего сигнала: так, сигнал системы Спротта B обладает наихудшими свойствами из всех рассматриваемых сигналов, уступая даже ЛЧМ-гармоникам.. Анализируя результаты экспериментов, можно заключить, что сигналы системы прото-Лоренц и обобщенной системы Чуа демонстрируют на порядок лучшую различимость по сравнению с сигналом системы Спротта B и ЛЧМ-гармониками.. . Рис. 14 – Анализ тестируемых сигналов с различным количеством сигналов-помех в канале. Это имитирует процесс смешения с другими зондирующими сигналами в среде. В качестве помех выступают хаотические сигналы систем Спротта D, E, G и H. . Рис. 15 – Анализ тестируемых сигналов с различным количеством сигналов-помех в канале, при этом 50% помех являются ЛЧМ-гармониками с различными параметрами, а 50% — хаотическими сигналами систем Спротта.. Проведено исследование влияния водной среды, шума и перекрестных помех на хаотические и ЛЧМ-сигналы, осуществленное способом имитационного моделирования. Для генерации хаотических сигналов численно решались системы дифференциальных уравнений Спротта B и C, а также обобщенные системы Чуа и прото-Лоренца. Хаотические сигналы продемонстрировали лучшую по сравнению с ЛЧМ сигналами устойчивость к факторам, действующим в гидроакустическом тракте. Они меньше поглощаются водной средой, а индивидуальная форма позволяет им оставаться различимыми на фоне равномощных с ними сигналов-помех, присутствующих в канале.. Было установлено, что некоторые хаотические сигналы обладают лучшими гидроакустическими свойствами, чем другие. Предпочтительными оказались сигналы с бо́льшей шириной спектра, а также с бо́льшим числом бассейнов притяжения в аттракторе. Обнаружено, что существенное значение имеет не только выбор конкретного хаотического осциллятора, но также начальных условий запуска генератора. Неправильно выбранные начальные условия могут изменить поведение системы, сократив число бассейнов притяжения. Таким образом, при использовании систем с большим количеством бассейнов притяжения в аттракторе необходимо более тщательно подходить к вопросу выбора начальных условий при запуске генератора сигналов.. Дальнейшими направлениями работы будут являться теоретический и экспериментальный анализ свойств хаотических сигналов, а также сопоставление аналитических метрик сигналов, результатов вычислительных экспериментов и данных натурных экспериментов по прохождению хаотических сигналов в водной среде.. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект «Теория и средства проектирования цифровых генераторов хаотических сигналов» (Договор № 17-07-0086217 от 10.04.2017).