

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБУЧАЮЩЕГО НАБОРА ИЗОБРАЖЕНИЙ НЕЙРОСЕТЕВОГО ГИДРОЛОКАТОРА

Сюзев В.В., д.т.н., профессор, профессор каф. ИУ6 МГТУ им. Баумана

Сотников А.А., к.т.н., доцент каф. ИУ6 МГТУ им. Баумана, e-mail: sotnikov@bmstu.ru

Баранова С.Н., асс. каф. РГРТУ, e-mail: baranova.sv.n@gmail.com

SIMULATION MODELING OF TEST AND TRAINING DATASETS OF A NEURAL NETWORK SONAR DETECTOR

Syuzev V.V., Sotnikov A.A., Baranova S.N.

The use of neural network technologies is actively used in problems where mathematical and algorithmic solutions are difficult to formalize. The method of simulation modeling of sonar scenes developed by the authors ensures the adequacy of the data obtained by using as reference data samples of sonar signals obtained earlier as a result of field experiments. The described approach will allow saving the formation and Fourier transform when simulating training signals on a beam, while simultaneously providing modeling of hydroacoustic scenes for various parameters when using a binary weighted representation.

Key words: simulation modeling, neural networks, spectrogram, bit plane, binary representation.

Ключевые слова: имитационное моделирование, нейронные сети, спектрограмма, битовая плоскость, бинарное представление.

Введение

В последние десятилетия наблюдается существенное расширение спектра научно-технических задач, успешно решенных с помощью нейросетевых технологий. Подобный прорыв стал возможным благодаря существенно возросшей в последнее время вычислительной мощности аппаратного обеспечения обработки данных и одновременному развитию алгоритмических и программных средств нейронных сетей. Наибольший эффект от применения нейросетевых технологий удалось достигнуть в распознавании образов и других направлениях, где математическое и алгоритмическое обеспечения решения поставленной задачи являются трудно формализуемыми.

В процессе разработки бортовых вычислительных систем современных подводных комплексов одной из наиболее актуальных задач является обнаружение и распознавание неоднородностей на фоне помех, водной поверхности и рельефа дна. Однако получение изображений для распознавания образов по традиционно применяемым телевизионному и тепловизионному каналам в этом случае является невозможным в силу физических особенностей распространения волн в водной среде, а наиболее эффективным методом сбора информации об окружающих подводных объектах является активная гидролокация. Относительно низкая скорость потока гидроакустических данных (не более 100 Мбит/с до первичной обработки, осуществляемой в виде цифрового гетеродинамирования, и не более 10 Мбит/с после) делает привлекательным решение задачи гидролокационного обнаружения и распознавания образов с использованием достаточно хорошо развитой на данный момент технологии нейронных сетей [1].

Нейросетевые технологии активно применяются в задачах, где математическое и алгоритмическое обеспечения решения являются трудно формализуемыми. Разработанный авторами метод позволяет сэкономить вычислительные ресурсы при имитации обучающих данных нейросети гидролокатора, одновременно обеспечивая моделирование гидроакустических сцен для различных параметров при использовании представления в двоично взвешенном виде. Адекватность полученных данных обеспечивается за счет использования в качестве эталонных данных спектрограммы гидроакустических сигналов, полученных ранее в результате натуральных или вычислительных экспериментов.

Очевидно, что достижение необходимых технических эффектов в виде вероятности обнаружения объектов и достоверности их распознавания при применении нейронных сетей возможно только в том случае, если разработчик обладает большим и качественным набором технологических данных (гидролокационных сцен) для обучения и валидации нейросети. Гидролокационные сцены должны охватывать множество ракурсов различных подводных объектов, внешних условий и факторов, определяющих их вид на фоне различной помеховой обстановки. В идеале технологические данные должны быть получены в результате натуральных испытаний во всевозможных точках мирового океана, в различных гидрологических условиях, с множеством реальных подводных объектов в различных режимах движения, в разных режимах работы гидролокатора. По экспертным оценкам минимально необходимое количество гидролокационных сцен должно быть не менее одного миллиона. Получение такого количества данных в процессе натуральных испытаний на специализированных полигонах является практически недостижимой задачей в силу не только огромной трудоемкости и высокой стоимости экспериментов, но и из-за физико-технических ограничений возможностей управления параметрами водной среды и погодными условиями.

Эффективным методом преодоления ограничений

управления параметрами эксперимента и существенно ускорения процесса получения необходимого количества наборов данных является имитационное моделирование гидролокационных сцен. При этом условием качественного функционирования нейросети обнаружителя будет являться адекватность модели гидролокационных изображений. Исследованию обобщенных методов имитационного моделирования сигналов, в том числе и гидроакустических, посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых [2-5]. Разработанный авторами метод направлен на формирование обучающих наборов данных, представленных в виде гидроакустических изображений, для интеллектуального гидролокатора. Учитывая потребность в большом количестве изображений для обеспечения требуемого уровня качества обучения, предложенный метод по сравнению с существующими, позволяет увеличить количества обучающих изображений, за счет этапа двоично взвешенного их представления. Композиция двоично взвешенных плоскостей изображений, полученных в результате натуральных и вычислительных экспериментов [6], формирует новое множество синтезированных спектрограмм с различной шумовой и целевой ситуацией.

Имитационное моделирование гидроакустической обстановки

Разработанный авторами метод имитационного моделирования гидролокационных сцен обеспечивает адекватность полученных данных за счет использования в качестве эталонных данных отсчеты гидроакустических сигналов, полученных ранее в результате натуральных экспериментов, а также позволяет постоянно корректировать сформированный набор гидролокационных сцен с учетом вновь полученных экспериментальных данных.

Структурная схема имитационной модели гидроакустической сцены приведена на рис. 1.

Таким образом, гидроакустические изображения формируются в результате вычисления спектрограммы аддитивного сигнала, полученного в результате сложения по временным отсчетам дискретных элементарных гидроакустических сигналов, полученных в результате

имитационного моделирования.

1. Формирование отраженного сигнала на основе зондирующей посылки.

Имитационное моделирование зондирующего сигнала локатора после отражения от объекта локации сводится к следующим его основным преобразованиям:

– преобразование сигнала, связанное с внесением временной задержки τ , определяется выражением

$$x'_0(n) = x_0(n - \tau),$$

где величина временной задержки определяется выражением

$$\tau = \frac{2 \cdot D}{c},$$

где D – расстояние между локатором и объектом локации; c – скорость распространения волны зондирующего сигнала в физической среде;

– преобразование сигнала, связанное с внесением коррекции спектра сигнала в результате доплеровского смещения частоты зондирующего сигнала, реализуется на основе схемы гетеродинамирования. Перенос полосы частот выполняется на частоту доплеровского смещения Δf_o с последующей децимацией, а величина изменения спектра сигнала, обусловленного доплеровским смещением частот зондирующего сигнала на величину Δf_o определяется выражением

$$\Delta f_o = \frac{2 \cdot f_0 \cdot v \cdot \cos \alpha}{c},$$

где v – модуль вектора взаимной скорости локатора и объекта локации; f_0 – исходная частота зондирующего сигнала, α – угол наклона вектора взаимной скорости.

2. Формирование узкополосной помехи по заданным функциям спектральной плотности (ФСПМ) или автокорреляционной функции (АКФ) [7] в соответствии с заданным соотношением сигнал-шум K_{SNR} .

$$K_{SNR} \cdot \int_{f_{N0}}^{f_{N1}} S_{XN}(f) df = P_{XS},$$

где P_{XS} – мощность полезного сигнала; $S_{XN}(f)$ – функция спектральной плотности мощности узкополосной помехи, $f_{N0} \dots f_{N1}$ – диапазон частотного спектра узкополосной помехи.

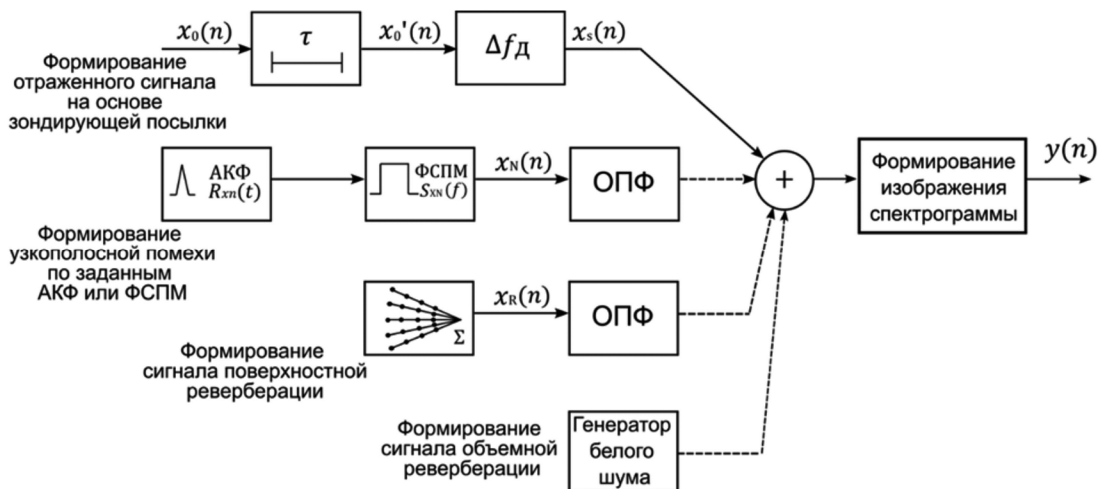
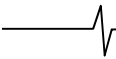


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели гидроакустической сцены



В случае, если помеха задаётся АКФ, то её ФСПМ рассчитывается согласно теореме Винера-Хинчина-Колмогорова, которая утверждает, что спектральной плотностью мощности стационарного в широком смысле случайного процесса является преобразование Фурье соответствующей автокорреляционной функции. Данное утверждение для дискретных сигналов иллюстрирует выражение

$$S_{XN}(k) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} R_{XN}(k) e^{-j2\pi kf}, k = 1, 2, \dots,$$

где $S_{XN}(k)$ ФСПМ; $R_{XN}(k)$ – АКФ.

Расчёт временной реализации сигнала осуществляется в соответствии с обратным преобразованием Фурье (ОПФ) [8].

3. Формирование сигнала поверхностной реверберации.

Имитационное моделирование поверхностной реверберации реализуется как имитационная модель аддитивного отраженного сигнала от всех рассеивающих неоднородностей границы раздела физических сред с учетом следующих предположений и допущений:

- рассеивающие неоднородности являются точечными;
- расположение неоднородностей является дискретным;
- неоднородности расположены в одной плоскости;
- вторичное рассеивание отсутствует;
- взаимное движение гидролокатора относительно объекта локации равномерно и прямолинейно.

Для определения взаимного геометрического расположения элементарных рассеивателей и определения параметров выражения поверхность неоднородностей условно разбивается на зоны равной площади ΔS . Каждой зоне неоднородностей ставится в соответствие точечный элементарный рассеиватель (рис. 2) [9].

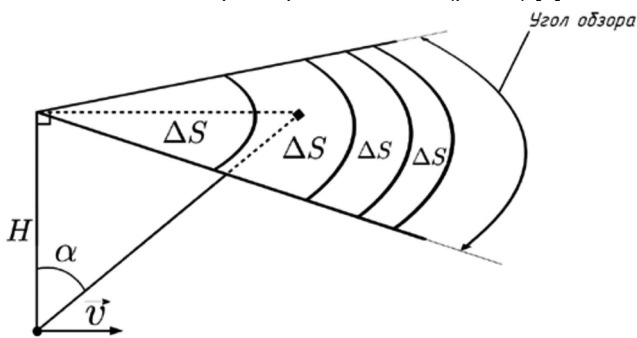


Рис. 2. Схема расположения зон неоднородностей при формировании сигнала поверхностной реверберации

В этом случае реверберацию можно представить канонической моделью и описать соотношением [10]

$$x_R(n) = \sum_{i=1}^{N_{rev}} s_i(n, \alpha_{revi}, \gamma_{revi}, R_{revi}, v_{revi}),$$

где N_{rev} – количество элементарных рассеивателей; s_i – реверберационный сигнал от i -го элементарного рассеивателя; α_{revi} – азимут i -го элементарного рассеивателя; γ_{revi} – угол места i -го элементарного рассеивателя; R_{revi} – расстояние от приемной антенны до

i -го элементарного рассеивателя; v_{revi} – радиальная составляющая скорости гидролокатора относительно i -го элементарного рассеивателя.

4. Формирование сигнала объемной реверберации.

Добавление широкополосной помехи ($\Delta f_{XN} > \Delta f_{XS}$).

Аддитивное имитационное моделирование отраженного сигнала также допускает применение широкополосного шума, алгоритмы формирования которого основаны на генерации последовательности некоррелированных нормально распределенных псевдослучайных чисел [11].

Формирование изображений спектрограммы

Формирование изображения спектрограммы осуществляется в результате предобработки результирующего гидроакустического сигнала. Предобработка сигнала осуществляет усиление полезного отраженного от объекта локации сигнала на фоне помех и ложных целей и в свою очередь состоит из трех последовательных операций [12]:

- лучеформирование – осуществляется с целью пространственной фильтрации, обеспечивающей усиление на фоне помех сигнала, находящегося в луче с заданными угловыми координатами [13];
- оконное преобразование Фурье – осуществляется с целью оценки изменяющегося во времени спектра сигнала и селекции сигнала, отраженного от подвижных объектов [12, 14];
- графическое представление изображений спектрограмм – осуществляется с целью представления результирующего предобработанного сигнала в заданном графическом формате, пригодном для обнаружения и классификации нейросетью гидролокатора.

Таким образом, в результате предобработки в спектрограмме цель оказывается отделенной от шумов и эхосигналов других объектов. Пример сформированной спектрограммы приведен на рис. 3. Спектрограмма представляет собой матрицу чисел, соответствующих интенсивности отраженного сигнала, строки матрицы соответствуют дальности до объекта, столбцы – частоте сигнала. Слева от отображения линии поверхностной реверберации отчетливо выделяется отметка от цели [15].

Учитывая результаты анализа алгоритма имитационного моделирования гидролокационных сигналов, проведенного в данном исследовании, изменение параметров объекта локации, таких как его угловые координаты, габариты, скорость и направление движения не будут оказывать влияния на изображение реверберации или других неоднородностей в спектрограмме, а лишь внесет изменение в расположение и интенсивность отметки заданной цели на спектрограмме. Аналогичным образом изменение глубины зондирования приведет к изменению реверберационной картины без изменения изображения цели при условии неизменности взаимного расположения и взаимной скорости движения гидролокатора и цели.

Данный подход, основанный на декомпозиции спектрограммы на изображения цели, реверберации и прочих неоднородностей, стал предпосылкой к исследованию метода имитационного моделирования гидролокационных сцен, основанного на непосредственном формировании спектрограмм, полученных на базе эталон-



Рис. 3. Пример сформированной спектрограммы

ных версий. При этом эталонные версии спектрограмм могут быть получены одним из ресурсоемких способов (натурный эксперимент или имитационное моделирование сигнала), а вариации спектрограмм для нейросети, связанные с изменением, например, ряда параметров цели могут быть получены непосредственно модификацией эталонного изображения с предварительным разделением его на битовые плоскости.

Спектрограмма представляет собой изображение, содержащее матрицу яркостей, значения которых изменяются в диапазоне от 0 до 255. Значения пикселей изображения хранятся в формате байта (6).

$$\mathbf{G}_{N \times M} = \begin{pmatrix} g_{1,1} & \cdots & g_{1,M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N,1} & \cdots & g_{N,M} \end{pmatrix},$$

где \mathbf{G} – матрица яркостей изображения, g – значение яркости одного пикселя, $N \times M$ – размер изображения.

После преобразования матрицы яркостей в битовый формат, то есть перевод из десятичного значения яркости в 8-битное двоичное представление она становится расширенной по горизонтальной координате (7) [16, 17].

$$\mathbf{G}_{(N \times M)10} = \mathbf{G}_{(N \times (M \times 8))2}$$

где \mathbf{G} – матрица значений яркостей, $N \times M$ – размер матрицы яркостей, $M \times 8$ – количество значений в битовом представлении.

Из полученной матрицы можно сформировать независимые изображения по тем же значениям дальности и частотам исходной спектрограммы. Количество битовых плоскостей изображения равно 8, так как на хранение значения одного пикселя выделяется 1 байт (8) [18, 19].

$$\mathbf{V}_{N \times M}^k = \begin{pmatrix} g_{1,8-k} & g_{1,16-k} & \cdots & g_{1,8M-k} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ g_{N,8-k} & g_{N,16-k} & \cdots & g_{N,8M-k} \end{pmatrix},$$

где \mathbf{V} – матрица битовой плоскости, k – номер разряда байта, плоскость которого формируется, $k = \overline{0,7}$, g – значение соответствующего бита.

Полученные таким образом изображения соответствующие весам 128, 64, 32, 16, 8, 4, 2, 1 представлены на рис. 4.

Из анализа рис. 4 можно сделать выводы о возможности идентификации цели на трех старших битовых плоскостях. Остальные битовые плоскости в основном отображают помеховую обстановку.

Пример модификации исходных спектрограмм, основанной на независимом использовании информации о цели и реверберационной информации приведен на рис. 5.

Заключение

В результате проведенного исследования сделан вывод о пригодности спектрограммы и её бинарного представления для использования в качестве обучающих наборов для интеллектуального гидролокатора, а также о возможности существенного сокращения времени формирования обучающих изображений за счет непосредственного синтеза спектрограмм на базе эталонных их версий с учетом изменения отдельных параметров гидроакустической обстановки. Уменьшение времени синтеза обучающих изображений в свою очередь позволяет обеспечить полноту обучения, а применение эталонных спектрограмм в качестве базовых позволяет сохранить адекватность имитационного моделирования.

В качестве перспективного направления продолжения данного исследования планируется провести дополнительный анализ других видов изображений для повышения качества обучения нейросети гидролокатора, увеличения вероятности обнаружения и достоверности распознавания цели.

Примером такого дополнительного изображения может являться распределение фаз сигнала на спектрально-временной плоскости.

Методология моделирования и представления дополнительной информации не отличается от рассмотренной выше, а представление информации в двоично взвешенном виде расширяет возможности её применения и создает дополнительные возможности синтеза новых спектрограмм по шумовой обстановке и отображению цели разных размеров, скорости и расстояния до цели.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00049, <https://rscf.ru/project/22-11-00049/>.

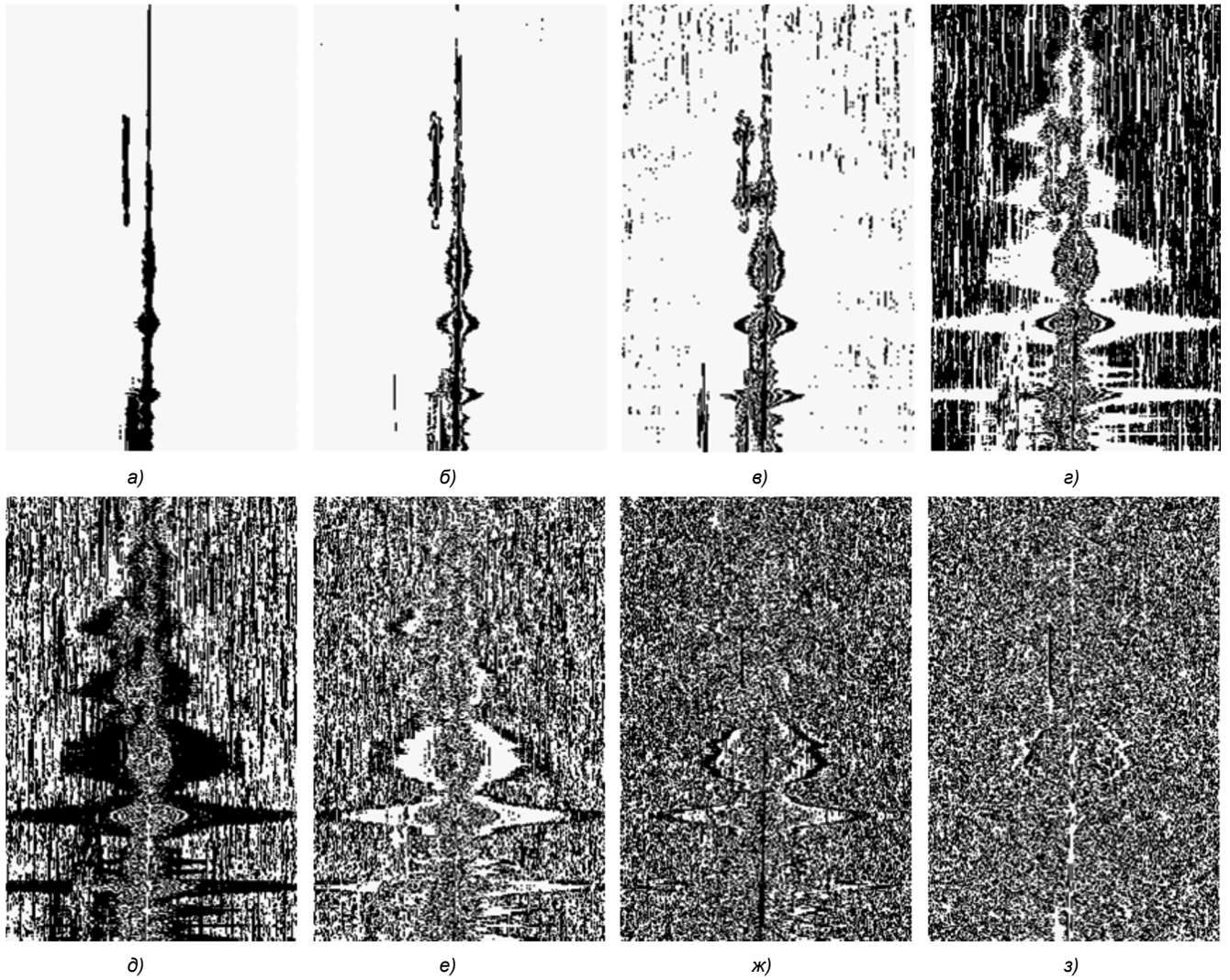
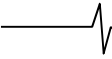


Рис. 4. Битовые плоскости спектрограммы: а) 7-го разряда, б) 6-го разряда, в) 5-го разряда, г) 4-го разряда, д) 3-го разряда, е) 2-го разряда, ж) 1-го разряда, з) 0-го разряда

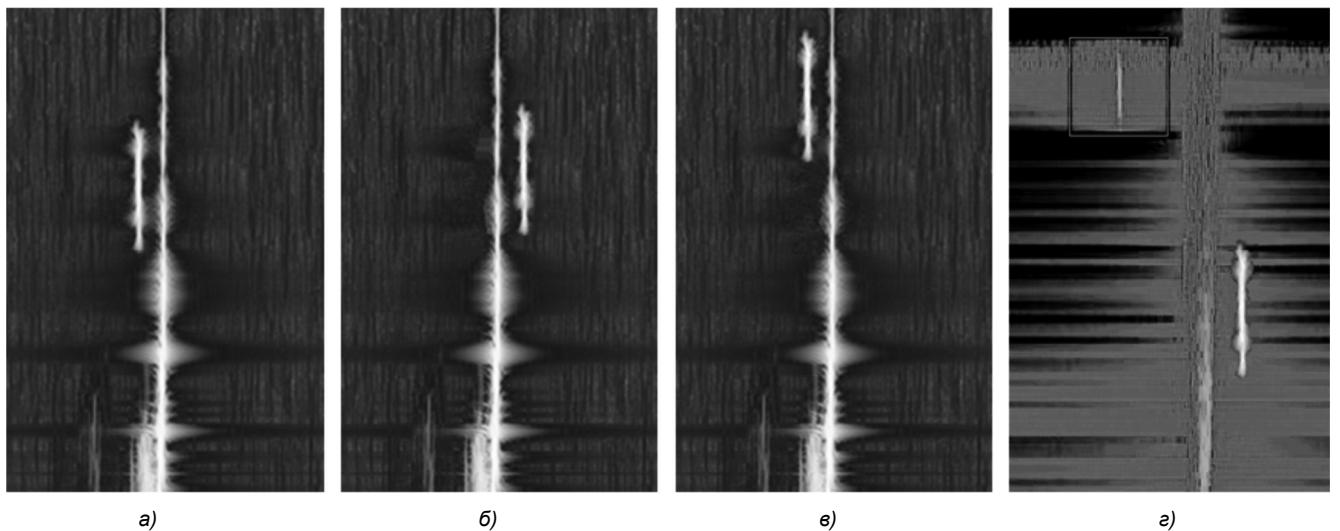


Рис. 5. Пример модификации исходных спектрограмм: а) исходная спектрограмма – цель удаляется от гидролокатора, б) модификация исходной спектрограммы – цель приближается к гидролокатору, в) модификация исходной спектрограммы – цель находится на большем удалении от гидролокатора, г) цель с исходной спектрограммы помещена в другую гидролокационную обстановку (в левом верхнем углу рамкой выделена цель изначально принадлежащая данной спектрограмме)

Литература

1. Ким Т.А., Розанов И.А., Арещенков Д.А., Сотников А.А., Анализ областей применения технологии искусственного интеллекта в системах имитационного моделирования многомерных сигналов и информационно-управляющих системах реального времени. Технологии инженерных и информационных систем. Московское НТО радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2022, № 3, с. 85-91.
2. P. Etter, *Underwater Acoustic Modelling and Simulation*. CRC Press, 2013, ZSCC: NoCitationData[s0], ISBN: 978-1-4822-9514-6. DOI: 10.1201/b13906. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1201/b13906>.
3. Ким Т.А., Арещенков Д.А., Сотников А.А. Исследование средств имитационного моделирования многомерных сигналов в системах искусственного интеллекта реального времени. Современные наукоемкие технологии. 2022. № 10-2. С. 218-225.
4. Ольшевский В.В. Статистические методы в гидролокации. Л.: Судостроение, 1983. 280 с.
5. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Сов. радио, 1971. 275 с.
6. Розанов И.А., Сотников А.А. Метод адаптивного имитационного моделирования многомерных сигналов в информационно-управляющих системах реального времени. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки», 2022, № 10-2, С.87-92.
7. Сюзев В.В., Ким Т.А., Аскерова Н.А. Сотников А.А. Обобщенный многокритериальный метод моделирования многомерных сигналов в информационно-управляющих системах реального времени. Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты. Национальная научно-практическая конференция. РТУ МИРЭА. 2022 г.
8. Ким Т.А., Сотников А.А. Имитационное моделирование радиолокационных помех спектрально-корреляционными методами средствами модульной платформы PXI. Цифровая обработка сигналов и её применение (DSPA-2022) 24-я Международная конференция. Выпуск: XXIV. М.: Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, 2022. С. 225-230.
9. Розанов И.А., Сотников А.А. Метод адаптивного имитационного моделирования многомерных сигналов в информационно-управляющих системах реального времени. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2022. № 10-2. С. 87-92.
10. Крутяков М.А., Розанов И.А., Сотников А.А. Имитационное моделирование сигнала гидроакустической граничной реверберации в базисе Хартли. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2019. №1. С. 60-66.
11. Сунгатуллин Э.Н., Устименко В.М. Формирование широкополосных помех. Актуальные проблемы инфтелекоммуникаций в науке и образовании. 2016. С. 210-213.
12. H. Peyvandi, M. Farrokhrooz, H. Roufarshbaf, and S.-J. Park, 'SONAR Systems and Underwater Signal Processing: Classic and Modern Approaches', *Sonar Systems*. InTech, Sep. 12, 2011. doi: 10.5772/17505.
13. J.E. Thorne. «Approaches to sonar beamforming», *IEEE Technical Conference on Southern Tier*, Binghamton, NY, USA, 1990, pp. 69-78, doi: 10.1109/STIER.1990.324633.
14. Ким Т.А., Розанов И.А., Сотников А.А. Метод корреляционной обработки гидролокационных частотно-манипулированных сигналов. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки. 2022. № 9. С. 60-66.
15. Пономарева О.В., Пономарев А.В., Пономарева Н.В. Двумерные быстрые преобразования Фурье с варьируемыми параметрами. Цифровая обработка сигналов. 2022. № 3. С. 3-13.
16. Ортогональное кодирование бинарных изображений / Б.В. Костров, Н.Н. Гринченко, С.Н. Баранова, Е.А. Трушина, А.А. Выюгина. *Вестник ЯВВУ ПВО*. 2023. № 2. С. 82-87.
17. Костров Б.В., Гринченко Н.Н., Выюгина А.А., Баранова С.Н. Параллельные вычисления в задачах восстановления искаженных изображений в пространственно-спектральной форме. *Труды Института системного программирования РАН*, том 35, вып. 2, 2023, 157-168 DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(2)-11.
18. Математическая модель процесса передачи изображений на основе битовых плоскостей / Н.Н. Гринченко, С.Н. Баранова, М.А. Лобачев [и др.]. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. 2023. № 1. С. 82-89. URL: <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-1-82-89>
19. Бинаризация текстовых изображений на основе технологии битовых плоскостей / Б.В. Костров, Н.Н. Гринченко, С.Н. Баранова, Е.А. Трушина, А.А. Выюгина. *Вестник ЯВВУ ПВО* 2023. № 2. С.75-81.