

Рябенський В.М.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Ихсанов Ш.М.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Дьяконов А.С.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Стужук И.И.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ МОРСКИХ СУДОВ В ТЕХНОЛОГИИ AIS В УСЛОВИЯХ ПЛОТНОГО ПОТОКА СООБЩЕНИЙ

На кафедрі програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова (НУК) у наукових і навчальних цілях проводяться дослідження сигналів морських і річкових суден за технологією AIS (Automatic Identification System). Нині в цілодобовому режимі функціонують дві станції прийому AIS-сигналів на базі апаратно-програмних рішень грецького проекту MarineTraffic (на будівлі Інституту автоматики і електротехніки – MarineTraffic Station № 4757 і на базі відпочинку НУК в Очакові – MarineTraffic Station № 5064). В якості базового алгоритму виділення і дослідження сигналів на кафедрі використовується програма з відкритим кодом aisLiveData корпорації MathWorks (версія MATLAB R2015). Оптимізація програми дозволила збільшити кількість правильно декодованих повідомлень більш ніж утричі. Однак аналіз квадратурної інформації зі штатних антен, які дозволяють приймати цільний потік повідомлень, показав, що в цих умовах потрібне подальше вдосконалення алгоритму.

Корпорація MathWorks у версії MATLAB R2019 презентувала нову програму з приймання та обробки AIS-сигналів. У цій роботі наведено опис проведених доробок і оцінка їх ефективності порівняно з оновленою програмою корпорації MathWorks. Для порівняння ефективності програм використовувалися записи квадратурної інформації з виходу приймача RTL-SDR при підключенні до нього штатної антени станції № 4757. Прийом проводився на частоті роботи передавачів суден класу А. Виявлено, що версія програми корпорації MathWorks, представлена в Matlab 2019, дозволяє в середньому збільшити кількість виділених повідомлень більш ніж удвічі порівняно з версією в Matlab 2015. Приблизно такі ж результати отримані програмою першого етапу кафедральної оптимізації.

Нова оптимізація програми, спрямована на успішну роботу в умовах щільного потоку повідомлень, дозволила збільшити кількість виділених повідомлень більш ніж удвічі порівняно з програмою, представленою в Matlab 2019. Проведено також аналіз можливих відхилень і збоїв у роботі технології AIS.

Ключові слова: Automatic Identification System – AIS, MarineTraffic, приймач RTL-SDR, MATLAB, Maritime Mobile Service Identity – MMSI, синхронізує.

Анализ последних исследований и публикаций. Как отмечалось в работе авторов [1, с. 175], на кафедре программируемой электроники, электротехники и телекоммуникаций Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова (НУК) в научных и учебных целях проводятся исследования сигналов морских и речных судов в технологии AIS (Automatic Identification System). Сейчас в дополнение к станции приема AIS-сигналов на здании Института автоматики

и электротехники (MarineTraffic Station № 4757) функционирует аналогичная станция на базе отдыха НУК в Очакове (MarineTraffic Station № 5064).

В качестве базового алгоритма выделения сигналов использовалась программа с открытым кодом **aisLiveData** корпорации MathWorks (версия MATLAB R2015). Оптимизация программы позволила увеличить количество правильно декодированных сообщений более чем в 3 раза.

Однако анализ квадратурной информации со штатных антенн, которые позволяют принимать плотный поток сообщений, показал, что в этих условиях требуется дальнейшее совершенствование алгоритма. В то же время корпорация MathWorks в версии MATLAB R2019 презентовала новую программу по приему и обработке AIS-сигналов.

Постановка задачи. Целью работы является описание проведенных доработок и оценка их эффективности в сравнении с обновленной программой корпорации MathWorks. Дополнительно проводится анализ возможных отклонений и сбоев в работе технологии AIS.

Изложение основного материала исследований. Для решения поставленных задач были записаны квадратуры с выхода приемника RTL-SDR в 5 сеансах при подключении к нему штатной антенны станции № 4757. Прием проводился на частоте работы передатчиков судов класса А (161,975МГц). Краткая характеристика записей приведена в таблице 1.

Использовалась длина фрейма $2^{18} = 262144$ комплексных отсчетов с протяженностью во времени 1,14 с. Плотность сигналов для одного

файла определена по визуальному просмотру амплитудной развертки фреймов, для остальных использована линейная аппроксимация результатов автоматического обнаружения. Учитывая, что плотность сообщений на станциях варьируется в диапазоне 50–300 сообщений в минуту при одновременной работе по судам класса А и В, можно отнести первый файл к ситуации с повышенной плотностью сигналов, третий – к пониженной плотности, остальные – к средней плотности. Необходимо отметить, что в штатной аппаратуре станций используются отдельные аналоговые фильтры для сигналов судов классов А и В, что существенно повышает характеристики обнаружения. В приемниках RTL-SDR они отсутствуют.

Проблеме выделения AIS-сигналов из квадратурной информации уделено значительное внимание [3, с. 52–83; 4, с. 110–123]. Основная проблема при обработке плотного потока сообщений – это правильное выделение зоны существования сигналов во времени. Для уменьшения дисперсии отсчетов авторы применили скользящее усреднение амплитудной развертки фрейма с шагом в один отсчет. Для иллюстрации эффективности такого сглаживания на рисунке 1,а приведена исходная амплитудная

Таблица 1

Краткая характеристика записей

| № п/п | Дата записи | Количество фреймов | Средняя плотность сигналов AIS на фрейм |
|-------|--------------------|--------------------|---|
| 1. | 16.04.2019 | 44 | Близко к 3 |
| 2. | 03.05.2019 | 1054 | Около 2 |
| 3. | 20-21.06.2019 | 2796 | Менее 1 |
| 4. | 13.11.2019 (день) | 1626 | Около 2 |
| 5. | 13.11.2019 (вечер) | 2081 | Около 2 |

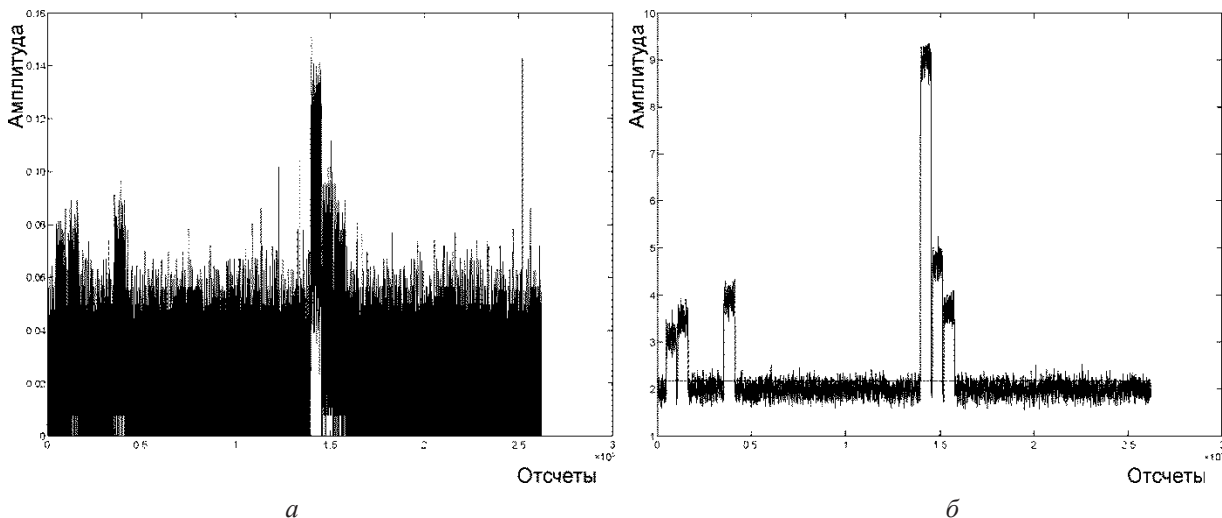


Рис. 1. Для 40-го фрейма первого файла: а) исходная амплитудная развертка фрейма; б) амплитудная развертка фрейма после скользящего усреднения

развертка для 40-го фрейма первого файла, на рисунке 1,б – та же развертка после скользящего усреднения на интервале 100 отсчетов.

После усреднения дисперсия помеховых отсчетов значительно уменьшилась, появилась возможность для всех сигналов выставить порог, при котором все сигнальные отсчеты находятся выше порога. При исходных амплитудах такая зона есть только у самого мощного сигнала, но и она находится ниже уровня помехи. Процедура скользящего усреднения реализуется без значимых затрат времени и требует менее сотой части от протяженности фрейма на ПК средней мощности (отсутствует необходимость деления на количество отсчетов, следующий суммарный отсчет получается из предыдущего удалением одного отсчета и добавлением другого).

При оценке среднего уровня помех необходимо исключить влияние наблюдаемых AIS-сигналов. В программе MathWorks это частично достигается поиском наиболее мощного сигнала и его последующим удалением из входной информации при поиске других сигналов. Авторы рассмотрели один из алгоритмов. Был поделен весь фрейм на 16 частей, в каждой части искали отсчет с минимальной амплитудой. Протяженность части была равна $2^{14} = 16384$, что превышает длину почти всех AIS-сообщений и позволяет уйти от сигнальных отсчетов, поскольку между сигналами разных судов должна быть пауза. Она обеспечивается алгоритмом SOTDMA, позволяющему всем судам, способным создавать помехи друг другу, использовать разделение передачи по времени и уложиться в четко выделенные временные промежутки. Средний уровень минимальных амплитуд, умноженный на постоянный коэффициент, и будет искомым порогом. На рисунке 1,б порог показан прямой линией при коэффициенте 1,35.

Далее, используя функцию *find()*, получим номера отсчетов превышающих заданный порог. За интервал существования сигналов было принято каждую из зон, в которой превысившие порог отсчеты размещены с достаточной плотностью (если номера двух соседних отсчетов, превысивших порог, отличаются более чем на заданную величину, зона текущего сигнала считается завершенной. Всего было установлено 9 отсчетов). Требуется, чтобы протяженность зоны была не менее минимальной длины возможного AIS-сообщения, было установлено 5000 отсчетов, немногим меньше количества отсчетов в коротком сообщении без учета времени разгона AIS-передатчиков и запасного буфера в 24 бита (5376 отсчетов).

Как отмечалось в [1, с. 174], сигналы от разных судов могут иметь смещение по частоте до 60 кГц, которое обычно компенсируется двумя методами – спектральным и по развернутой фазе. В предлагаемой авторами программе на развернутой фазе искали интервалы с достаточной длиной и малым изменением фазы. В каждом таком интервале отдельно проводилось определение скорости изменения фазы линейным методом наименьших квадратов. Результаты по всем интервалам либо взвешенно усреднялись, либо отдавалось предпочтение наиболее длинному интервалу в зависимости от разброса полученных измерений.

На рисунке 2 приведена развернутая фаза после двухэтапной компенсации смещения для самого слабого первого сигнала из рассмотренного выше фрейма. В начале развертки хорошо виден синусоидальный синхроимпульс, видно, что смещение компенсировано полностью. В этом фрейме из всех шести сигналов рассматриваемой программой выделены сообщения с корректными MMSI (Maritime Mobile Service Identity).

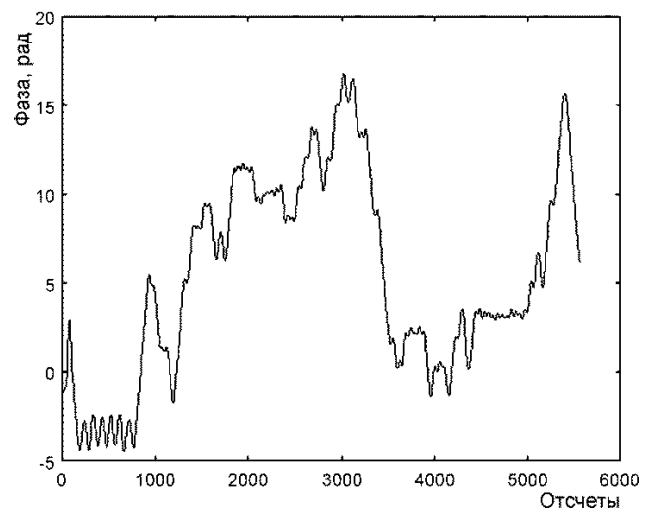
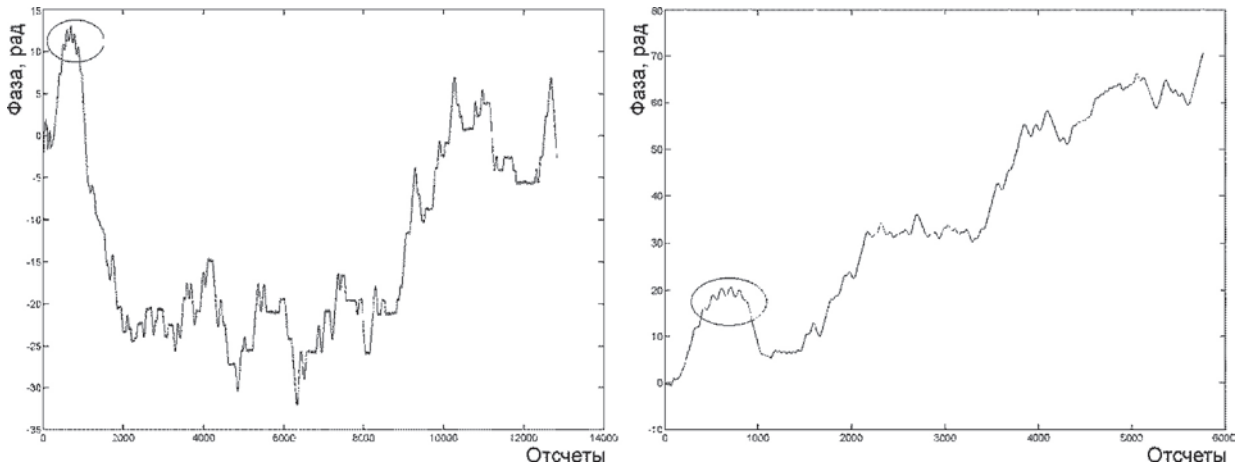


Рис. 2. Развернутая фаза для AIS-сигнала, представленного на рисунке 1,а

В этом файле из заметного числа сигналов с достаточной энергетикой не выделяются сообщения. Наиболее часто причиной тому является искажение синхроимпульса. На рисунке 3 приведена развернутая фаза для двух таких сигналов. Они взяты из 2-го и 17-го фреймов первого файла. Безусловно, эти сигналы являются AIS-сообщениями. Первым сигналом передано длинное сообщение. Впечатление такое, что на интервале излучения синхроимпульса развернутая фаза значительно увеличилась (около 10 радиан), а затем упала. Второй сигнал короткий, но поведение на интервале синхроимпульса аналогичное



а **Рис. 3. Развернутая фаза необнаруженных AIS-сигналов:** *б*
а) с фрейма 2 первого файла; *б)* с фрейма 17 первого файла

(вероятное место синхроимпульсов на развертке выделено овалом). Всего таких сигналов в первом файле около двух десятков. Скорее всего, это сигналы от одной и той же не очень исправной аппаратуры формирования AIS-сообщений.

Оказалось, что довольно просто определить источник таких сигналов. Снижение порога по коэффициенту корреляции при поиске со штатного значения **0,6** до значения **0,3** приводит к выделению корректных сообщений из части таких сигналов. Это происходит ввиду использования в технологии AIS двухступенчатой синхронизации. Ошибки привязки к синхроимпульсу в определенных пределах корректируются привязкой к Start Byte после получения битового потока. В первом файле обнаруживается одно сообщение (фрейм 9), а втором – выделяются 74 сообщения, в третьем файле такие сообщения не выделяются. Все они – сообщения четвертого типа и принадлежат не водному судну, а береговой службе с **User ID: 2723683**, которая по классификации сайта **www.marinetraffic.com** является “Manned VTS (Vessel Traffic Services)” – службой движения судов, расположенной на Русской косе на территории маяка и принадлежащей Николаевскому филиалу ГП «Госгидрография» (рис. 4).

Характер искажения синхроимпульса у всех сигналов одинаковый. Коэффициент корреляции с идеальным синхроимпульсом занижен и меняется в диапазоне 0,35–0,65. Это означает, что часть сигналов от этого источника обнаруживается при штатных параметрах рассматриваемой программы. Для второго файла это 25 сообщений. Для сравнения на рисунке 5 приведена развернутая фаза для сигнала с максимальным коэффициентом корреляции,

достигшим 0,653 (728 фрейм второго файла). Для стандартных AIS-сигналов коэффициент корреляции, как правило, превышает 0,9.



Рис. 4. Отображение на карте сайта www.marinetraffic.com источника AIS-сигналов с User ID: 2723683

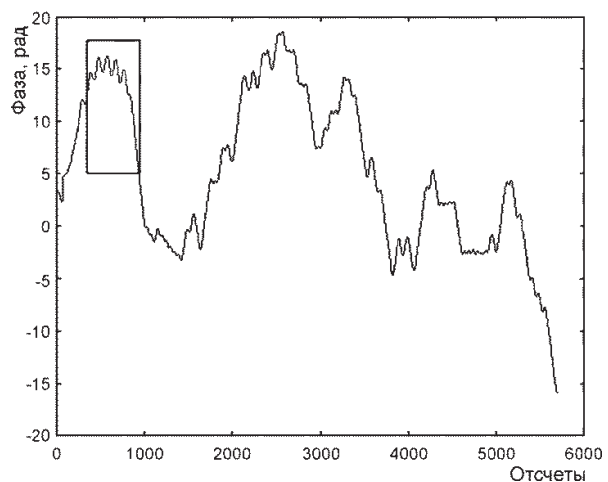
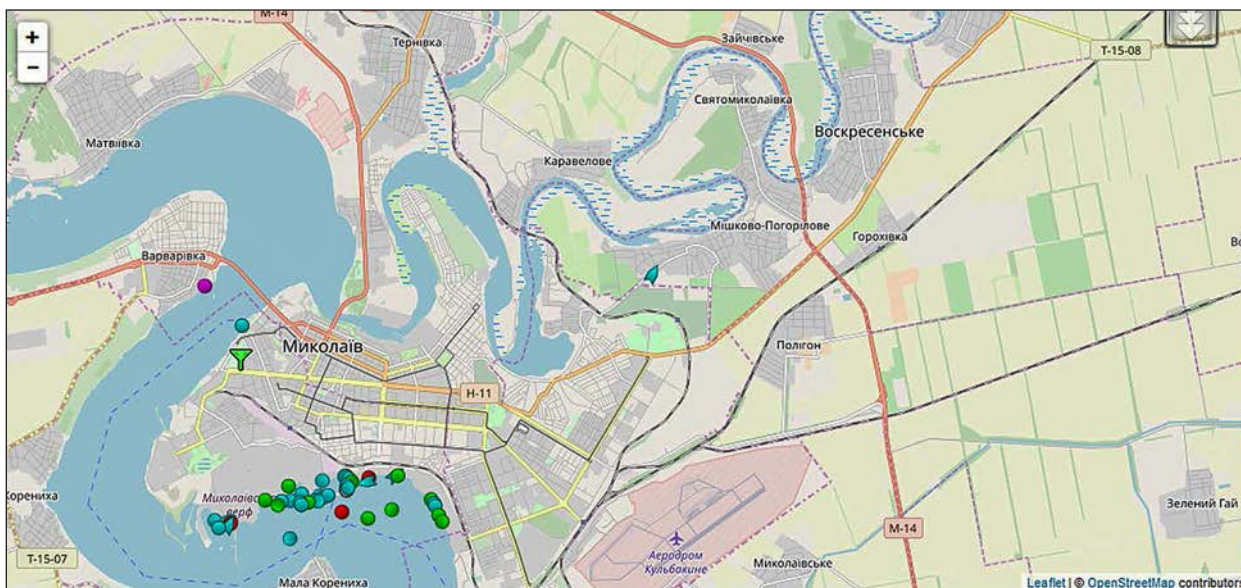


Рис. 5. Развернутая фаза сигнала источника 2723683 с максимальным коэффициентом корреляции

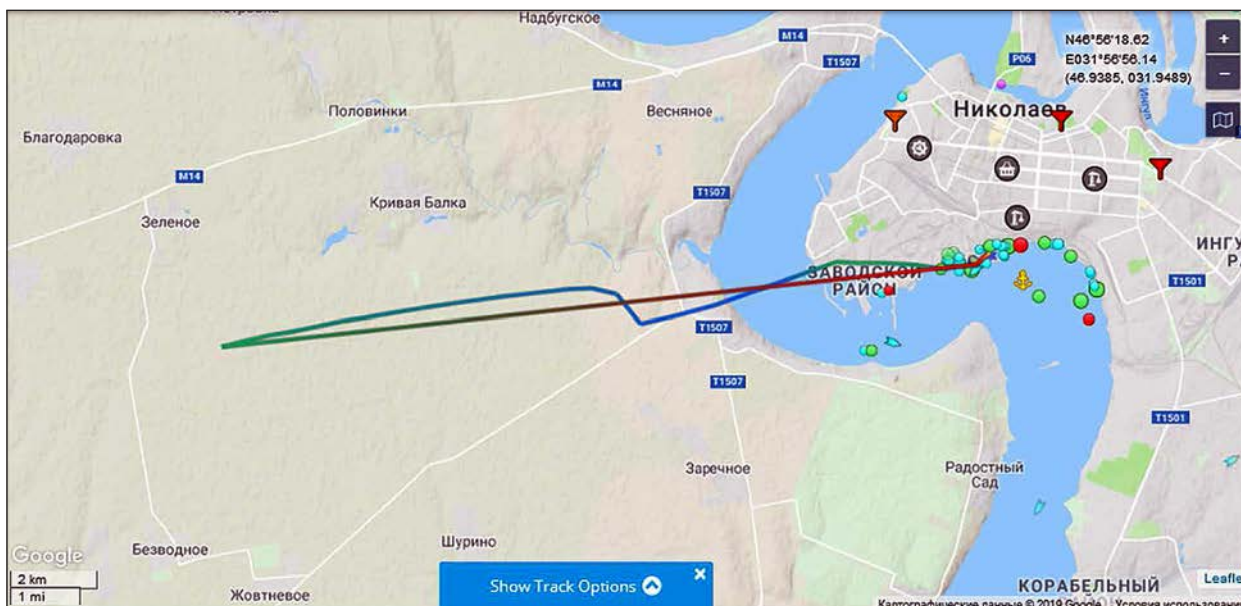
На рисунке прямоугольником выделена зона, соответствующая найденному программой синхроимпульсу. Его характер такой же, как на рисунке 3. Сотрудники известного филиала «Дельта-лоцман» государственного предприятия «Администрация морских портов Украины» также обратили внимание на этот источник AIS-сигналов. Он их заинтересовал, как источник AIS-сообщений № 17, по которым суда могут вводить дифференциальные поправки в свои координаты. В мае 2019 года участились случаи недопустимых скачков координат (до нескольких км) некоторых судов. Выяснилось, что выключение этого источника приводит к устра-

нению скачков. Такие скачки наблюдали также авторы по данным своей станции № 4757. Они обратили на них внимание в связи с отображением судов на глубокой суше (рис. 6,а-б):

Такие скачки координат могут объясняться и неисправностью навигационной аппаратуры самого судна. В настоящее время сигналы источника **2723683** фиксируются на сайте **www.marinetraffic.com** и присутствуют в новых файлах 4 и 5. Характер их инхроимпульса не изменился. Еще один сигнал, трудный для выделения сообщения, получен в 9 фрейме первого файла. На рисунке 7 наведена его развернутая фаза.



а



б

Рис. 6. Данные станции № 4757: а) за 13.09.2019; б) за 20.09.2019

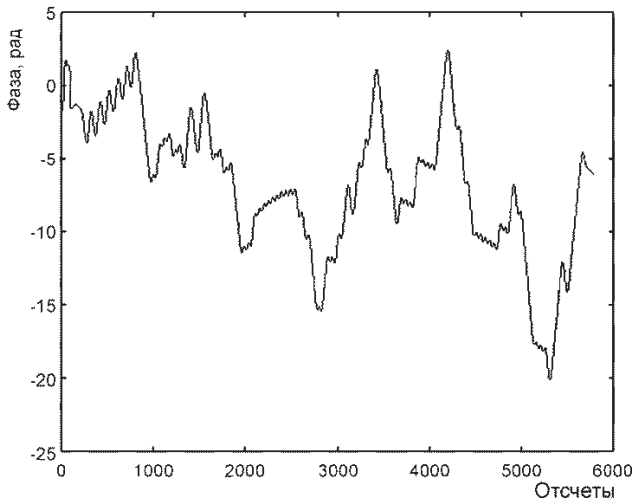


Рис. 7. Развернутая фаза сигнала с изменением смещения по частоте на интервале излучения

На интервале излучения практически идеального синхроимпульса видим заметное положительное смещение по частоте, затем оно уменьшается, и вторая половина сигнала имеет отрицательное смещение. Коэффициент корреляции составил 0,53; снижение порога приводит к выделению корректного сообщения:

FrameNumber=9, SignalNumber=2, msgType=1, cog = 0.530, MMSI: 677077500, Latitude: 46.945 Longitude: 31.9793

Marinetraffic выдает такую информацию о судне: MMSI:677077500 – “BRENTIX”, Oil/Chemical Tanker.

Такое поведение смещения по частоте можно было списать и на приемник RTL-SDR, который не способен выдерживать точное значение заданной частоты. Тем не менее, эту гипотезу пришлось отклонить, поскольку от этого судна получено довольно много сообщений (3 сообщения в первом файле, 174 сообщения во втором и 489 сообщений в третьем файле). Поведение выборочно просмотренных сигналов аналогично рис. 7, например у сигнала, полученного более чем через 2 месяца (третий файл, фрейм 649) развернутая фаза выглядит так (рис. 8): Еще более существенный случай сбоя информации наблюдался на интегральных характеристиках станций №№ 4757 и 5064 примерно за 2 месяца (рис. 9).

Без конкретного сообщения, которое привело к выдаче недопустимого максимального расстояния приема AIS-сигнала, невозможно понять причину сбоя. К уже перечисленным причинам может добавиться пропуск коротким кодом CRC (16 бит) заведомо сбойного сообщения. Вероятность совпадения такого кода CRC по сбой-

ной информации составляет $1/2^{16}$, например за 10 суток ежесекундной проверки кода CRC по равномерному некоррелированному битовому потоку вероятность случайного совпадения практически равна 1. В начавшей развиваться раньше технологии ADS-B для воздушных судов используется код CRC 24. Похоже, что на AIS-частотах могут присутствовать импульсные помехи. На рис. 10,а приведена амплитудная развертка после сглаживания для 38 фрейма первого файла.

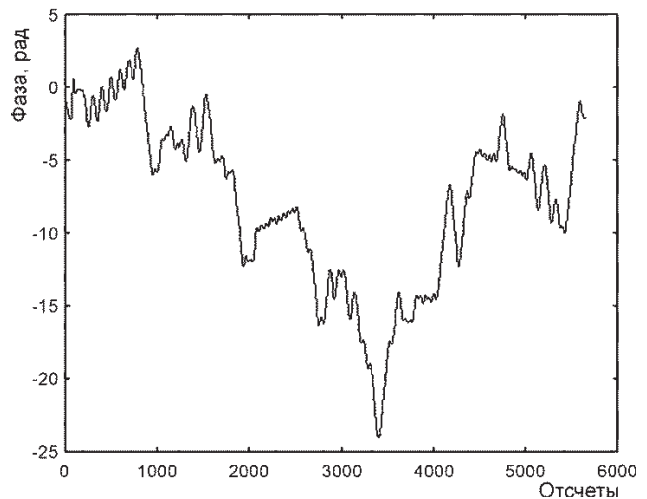


Рис. 8. Развернутая фаза сигнала от судна с MMSI 677077500 спустя более двух месяцев

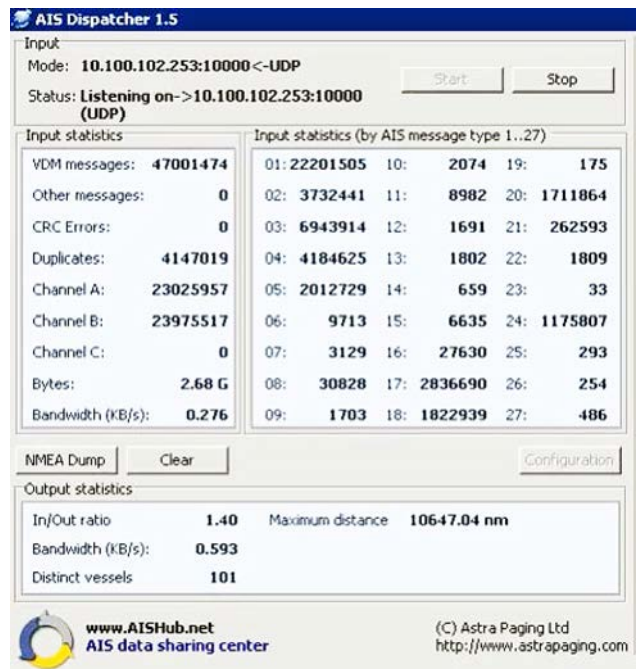


Рис. 9. Совместные интегральные характеристики станций №№ 4757 и 5064

Наблюдается очень протяженный во времени сигнал, ширина которого по уровню установленного порога составляет 46251 отсчет, что соответствует

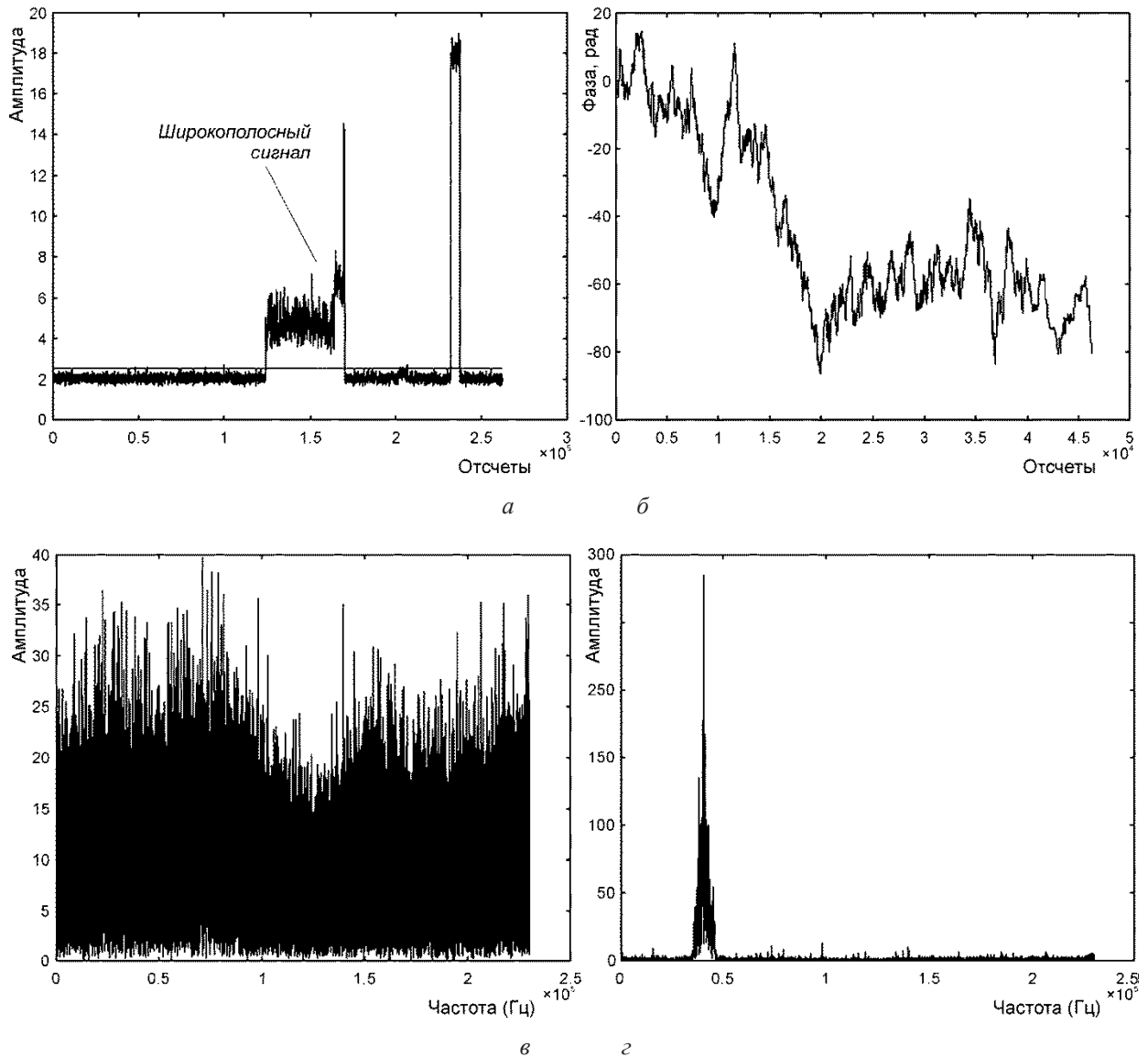


Рис. 10. Для 38 фрейма первого файла: а) амплитудная развертка с широкополосным сигналом; б) развернутая фаза широкого сигнала; в) спектр широкого сигнала; г) спектр второго изолированного сигнала

длительности более 8 слотов технологии SOTDMA (1 слот равен 256 битам или 6144 отсчетам), никакой паузы в излучении нет. Максимальная длина сообщения в технологии AIS может достигать 5 слотов для сообщения № 6 [5, с. 117–120]. На рисунке 10,б наведена для этого сигнала развернутая фаза.

Ни на этом рисунке, ни при разбиении всего интервала на части по 6000 отсчетам не обнаружено признаков AIS-сигналов, кроме конца интервала, где и на амплитудной развертке виден короткий сигнал несколько большей мощности. Этот сигнал при подходящем пороге успешно декодируется. Спектр длинного сигнала без обнаруживаемого сигнала наведен на рисунке 10,в. Для сравнения на рисунке 10,г приведен спектр

второго изолированного сигнала – стандартный узкополосный спектр для сигналов с GMSK-модуляцией (спектры приведены до компенсации смещения по частоте).

Такие протяженные сигналы с аналогичной спектральной и фазовой структурой в количестве нескольких десятков встречаются и в новых файлах 4 и 5. Протяженность достигает более 8 слотов. Относительно природы этих сигналов можно выдвинуть две гипотезы. Первая, что это вообще сигнал не от AIS-передатчиков, вторая – сигнал излучен неисправной AIS-аппаратурой, которая нарушила не только длительность сигнала, но и его фазовую структуру и спектр.

В заключение автора наводят результаты обработки различными программами файлов,

Результаты обработки различными программами файлов

| № файла | Количество выделенных программы сообщений AIS | | | |
|--|---|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | MathWorks R2015a | MathWorks R2019a | Оптимизированная авторами (2018 год) | Оптимизированная авторами (2019 год) |
| 1. | 38 | 38 | 58 | 88 |
| 2. | 866 | 871 | 1397 | 1791 |
| 3. | 391 | 585 | 1484 | 1543 |
| 4. | 346 | 1637 | 931 | 3303 |
| 5. | 682 | 1972 | 1449 | 4075 |
| Суммарно по всем файлам | 2285 | 5065 | 5261 | 10712 |
| Среднее время обработки одного фрейма (мс) | 41 | 297 | 135 | 169 |

приведенных в таблице 1 (таблица 2). Среднее время обработки одного фрейма получено на ПК средней мощности при запуске программ в Matlab 2019. Авторы обращают внимание на значительную зависимость эффективности различных программ от конкретной сигнальной обстановки. Так, если сравнить версии программ в Matlab 2019 и 2015, то во втором файле сообщений выделено практически одинаковое количество, в четвертом же в новой программе выделено сообщений почти в 5 раз больше.

В среднем количество выделяемых сообщений увеличилось более чем в **2 раза**, значительно увеличились и вычислительные затраты – более, чем в 7 раз. Учитывая длительность фрейма в 1,14 с, новая программа с запасом может работать в реальном времени. Новая доработка программы, направленная на успешную работу в условиях плотного потока сообщений, оказалась вполне эффективной и позволила в среднем увеличить

количество выделяемых сообщений еще примерно в **2 раза** по сравнению с предыдущей доработкой. По файлу с низкой плотностью выигрыша практически нет (файл 3), и выигрыш достигает 3,5 раза по плотному потоку сообщений в файле 4. Выигрыш относительно новой программы в Matlab 2019 в среднем немного выше и составляет **более 2 раз**, но здесь результат более равномерный по файлам (по всем более 2 раз). Вычислительных ресурсов она требует почти в 2 раза меньше.

Выводы. Проведена дальнейшая оптимизация программы выделения AIS-сигналов, представленной в работе авторов [1], для условий плотного потока сообщений морских и речных судов. Показано, что количество выделяемых сообщений, по сравнению с программой корпорации MathWorks, презентованной в составе Matlab 2019, выше более чем в **2 раза**. Дополнительно проведен анализ возможных отклонений и сбоев в работе технологии AIS.

Список литературы:

1. Дьяконов А.С., Рябенский В.М., Ихсанов Ш.М. Прием и исследование сигналов морских судов в технологии AIS : Матеріали міжнародної науково-практичної конференції Modern information and innovation technologies in transport MINTT-2019. May 28–30, 2019. Kherson, Ukraine. Тези доповіді. С. 173–176.
2. Ихсанов Ш.М., Рябенский В.М., Дьяконов О.С. Дослідження сигналів реальних інформаційних систем із використанням приймачів RTL-SDR : навч. посіб. / Ш.М. Ихсанов, В.М. Рябенский, О.С. Дьяконов. Миколаїв, 2018. 183 с.
3. Andis Dembovskis. AIS message extraction from overlapped AIS signals for SAT-AIS applications : DISSERTATION zur Erlangung des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften. Dr. rer. nat. Vorgelegt im Fachbereich 3 (Mathematik & Informatik) der Universität Bremen im März 2015. 149 p.
4. Fabio Mazzarella, Michele Vespe, Alfredo Alessandrini, Dario Tarchi, Giuseppe Aulicino, Antonio Vollero. A novel anomaly detection approach to identify intentional AIS on-off switching : Expert Systems with Applications. Volume 78, 15 July 2017, P. 110–123.
5. Recommendation ITU-R M.1371-5. Technical characteristics for an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band : International Telecommunication Union. Radiocommunication Sector of ITU. Electronic Publication, Geneva, 2014. 150 p.

Riabenyi V.M., Ikhsanov Sh.M., Diakonov O.S., Stuzhuk I.I. ALGORITHM IMPROVEMENT FOR SIGNAL DETECTION OF SEA VESSELS IN AIS-TECHNOLOGY UNDER DENSE FLOW OF MESSAGES

AIS-signals (Automatic Identification System) of sea and river vessels are detected and analyzed at the Department of Programmable Electronics, Electrical Engineering and Telecommunications of the Admiral Makarov National University of Shipbuilding for scientific and educational purposes. Currently 24/7 the department hosts two Marine Traffic stations (station № 4757 is placed in Mykolaiv, and station № 5064 – in Ochakiv), which feed data to the Marine Traffic server. During the study the open source program ais Live Data written in MATLAB R2015 was used as a basic algorithm for detecting and analyzing AIS signals.

Optimization of this program allowed increasing the number of correctly decoded messages by more than 3 times. However, the analysis of quadrature information from standard antennas, allowing receiving a dense message flow, showed that in these conditions a further improvement of the algorithm is required. At the same time, MathWorks Corporation in the version of MATLAB R2019 introduced a new program for receiving and processing AIS signals.

This paper describes the algorithm improvements and evaluates their effectiveness compared to the updated program in MATLAB R2019. To compare the effectiveness of the programs used, quadrature recordings were obtained using the RTL-SDR receiver when the standard antenna of station № 4757 was connected to it. Signal reception was carried out at the frequency of operation of AIS class A transponders.

It is shown that program in MATLAB R2019 allows on average to increase the number of decoded messages in comparison with program in MATLAB R2015 version. Approximately the same results were obtained by the program after the first stage of author's optimization. The new program optimization, aimed at successful work in a dense message flow, allowed to increase the number of decoded messages by more than 2 times compared to the program presented in MATLAB 2019R. An analysis of possible deviations and malfunctions in the operation of AIS technology was also conducted.

Key words: *Automatic Identification System – AIS, MarineTraffic, RTL-SDR receiver, MATLAB, Maritime Mobile Service Identity – MMSI, training sequence.*