

УДК 629.5.069 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.2.17.24

О возможности собственного определения местоположения судна на основе сигналов системы АИС

С. В. Трусов, к. т. н., *trusov_sv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

О. И. Барабошкин, *baraboshkin_oi@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. М. Кузнецов, к. т. н., *kuznetsov_am@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. А. Бобровский, *bobrovsky_sa@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается вопрос об альтернативном способе вычисления местоположения судна для детектирования преднамеренного локального искажения навигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS («спуфинг»). Предложен способ определения координат судна на основе комплексирования измерений углов прихода сигналов системы АИС от соседних судов и содержащихся в этих сигналах координат судов. Рассмотрен вариант схемы приемного устройства для осуществления данного способа на основе фазовой радиопеленгации простой двухантенной системой. Показана возможность определения направления прихода сигнала со средней ошибкой 2° при расстоянии между двумя антеннами (каждая длиной $\lambda/4$), равном λ . Исходя из ошибок радиопеленгации проведена оценка точности методов определения координат по двум и трем источникам сигнала. Построены карты применимости данного способа определения координат для региона Охотского моря. Показано, что при ошибке радиопеленгации 2° ошибка определения координат судна составит не более 4 км в зависимости от количества и взаимного расположения источников сигналов АИС. Предложенное решение может быть использовано в составе технических средств контроля рыбопромыслового флота.

Ключевые слова: АИС, ОСМ Росрыболовства, ГНСС-спуфинг, радиопеленгация

Possibility of Independent Self-Positioning of a Vessel Based on Signals from the AIS System

S. V. Trusov, *Cand. Sci. (Engineering)*, *trusov_sv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

O. I. Baraboshkin, *baraboshkin_oi@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

A. M. Kuznetsov, *Cand. Sci. (Engineering)*, *kuznetsov_am@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

S. A. Bobrovskiy, *bobrovsky_sa@spacecorp.ru*

Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The work aims to find an alternative method of calculating the position of a vessel in order to detect the deliberate local distortion of the GLONASS and GPS navigation signals (spoofing). A method for determining the coordinates of the vessel based on the combination of measurements of the AIS signal arrival angles from neighboring vessels, as well as the coordinates of the vessels contained in these signals, is proposed. A variant of the receiver circuit for implementing this method based on phase direction finding by a simple two-antenna system is considered. The possibility of determining the direction of arrival of a signal with an average error of 2° is shown with the distance between the two antennas equal to λ (with each antenna $\lambda/4$ long). Based on the radio direction finding errors, the accuracy of the methods for determining the coordinates was estimated from two and three signal sources. The maps of the applicability of this method of location for the Sea of Okhotsk region have been constructed. It is shown that within a 2° radio direction finding error, the error in determining the coordinates of the vessel will be no more than 4 km, depending on the number and relative position of the sources of AIS signals. The proposed solution can be used as part of the technical means of control of the fishing fleet.

Keywords: AIS, Fishing Industry Monitoring System, GNSS-spoofing, radio direction finding

Введение

Для предотвращения незаконного, несообщаемого и нерегулируемого промысла морских биоресурсов с 1999 г. в Российской Федерации эксплуатируется отраслевая система мониторинга водных биологических ресурсов, наблюдения и контроля за деятельностью судов рыбопромыслового флота (ОСМ). Под контролем системы находятся 3500 судов [1].

Контроль за передвижением судов осуществляется с помощью технических средств контроля (ТСК), обязательных к установке на промысловых судах. В состав ТСК, согласно [2], должны входить: приемник сигналов ГЛОНАСС/GPS, судовой терминал спутниковой связи (Гонец, Inmarsat), приемо-передатчик системы АИС. ТСК должен обеспечивать точность определения местоположения судна не хуже 100 м и передачу данной некорректируемой информации через спутниковый терминал в региональный центр мониторинга (РЦМ) ОСМ [2].

Проблемным моментом при использовании данного метода контроля местоположения судов является возможное искажение реальных перемещений судна за счет локальной подмены навигационного ГЛОНАСС/GPS-сигнала («спуфинг»). Оборудование для проведения спуфинг-атак становится все более доступным и может стать распространенным инструментом при браконьерстве, поскольку при его применении не нарушаются требования законодательства [2]: целостность ТСК не нарушается, в процессе передачи информация не корректируется.

В системе ARGOS, передатчики которой использовались ранее в качестве ТСК, существует альтернативная возможность определения местоположения на основе доплеровских измерений характеристик сигнала с точностью 150–300 м, но с 2016 г. передатчики ARGOS не могут быть использованы в качестве ТСК на российских судах. В связи с этим актуальной задачей является нахождение альтернативного способа определения и автоматической регистрации координат судна.

В данной работе рассматривается подход к определению координат судна с использованием специальной приемной аппаратуры сигналов АИС, которую предлагается включить в состав ТСК.

Основным отличием данной аппаратуры от обычного приемника сигналов АИС является антенная система, позволяющая определить углы прихода сигналов. Эта информация в комплексе с данными о расположении источников этих сигналов позволяет определить собственное местоположение судна. Рассматриваются проблемы точности определения местоположения судна в зависимости от ряда факторов.

Принципиальная возможность определения собственного местоположения судна по сигналам АИС

Предлагаемый подход к определению координат основывается на следующих положениях:

1. Знание координат источников сигнала и направления прихода этих сигналов позволяет определить положение приемника и соответственно судна.

2. Вокруг рыболовного судна в зоне радиовидимости приемника АИС (20–40 миль) есть как минимум один источник сигналов АИС (судно или береговая станция), передающий свои координаты (сообщения АИС типов 1, 2, 3, 4, 11, 18, 21, 27) и не подверженный воздействию средств спуфинга.

3. Известен ряд методов радиопеленгации [3], позволяющих определить направления прихода сигналов от каждого из судов.

Исходными данными для выбора метода определения местоположения целевого судна могут быть: информация о скорости, курс судна и количество судов в зоне радиовидимости. В зависимости от набора доступных исходных данных для определения местоположения судна могут быть использованы следующие известные методы вычисления:

1. При наличии данных о скорости и курсе данного судна и регистрации углов прихода сигналов АИС от одного источника можно определить местоположение данного судна методом крьюис-пеленга, путем обработки разновременных измерений [4];

2. При наличии данных о курсе и углах прихода АИС-сигналов от двух источников можно использовать метод пеленга двух ориентиров [4];

3. При регистрации углов прихода сигналов АИС от трех источников можно определить местоположение методом обратной однократной засечки [5];

4. При регистрации углов прихода сигналов АИС от четырех источников и более используется метод обратной многократной засечки [5].

В данной работе рассматриваются характеристики второго и третьего методов, поскольку первый метод требует движения определяемого судна и неподвижности судна — источника сигнала АИС, что по экспертным оценкам является маловероятной ситуацией, а четвертый — требует большого количества источников сигнала АИС.

В общем случае точность методов определяется точностью координат источников сигнала АИС и точностью определения углов прихода этих сигналов. Точность координат источников составляет 10–100 м и в данной работе не рассматривается.

Точность определения углов прихода сигналов АИС зависит от системы регистрации сигналов и относительного расположения источников сигналов АИС. Детальнее эти факторы рассматриваются в следующих разделах.

Система определения углов прихода сигналов АИС

Согласно [3] методы определения углов прихода сигнала АИС разделяются на амплитудные, фазовые и комплексные. Для метода, использующего амплитудные характеристики сигнала (амплитудный и комплексный методы), требуются антенная система, состоящая из антенн с некруговой диаграммой направленности. При длине волны $\lambda = 1,85$ м на частотах АИС такая антенная система будет очень громоздкой, сложной для установки на судно и достаточно дорогой. В связи с чем предпочтительнее использовать фазовый метод пеленгации.

В [3] представлен метод фазовой пеленгации с использованием двух антенн. Антенны расположены на расстоянии друг от друга, называемом базой. Каждая из антенн может иметь круговую диаграмму направленности и представлять собой четвертьволновый штырь. От длины базы зависит

точность пеленгации и сложность размещения на судне. Чем база больше, тем точнее можно определить направление, но сложнее установка. Недостатком рассматриваемого метода является неоднозначность определения направления — при длине базы $l < \lambda / 2$ таких направлений два, при $\lambda / 2 < l < \lambda$ — четыре и т. д. Для решения задачи **контроля** полученной от другого судна информации неоднозначность не играет существенной роли, т. к. информация АИС от обоих судов позволяет разрешить эту неоднозначность.

Таким образом, предлагается следующая схема приемника АИС, совмещенного с системой радиопеленгации. Сигналы от двух антенн, находящихся на расстоянии l друг от друга, передаются в ВЧ-тракт приемника, где независимо фильтруются и оцифровываются двумя аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) с общим тактовым генератором. Один из сигналов обрабатывается так же, как и в обычном приемнике АИС, при этом определяется начало и конец каждого сообщения АИС. Эта информация передается в модуль приемного устройства, содержащий фазовый пеленгатор. Данный модуль совместно обрабатывает два сигнала, содержащих одно и то же сообщение АИС, осуществляет демодуляцию сообщения и выдает искомым угол (рис. 1).

Расчет точности определения углов прихода сигнала АИС

На точность определения углов прихода сигналов АИС при использовании предложенной схемы приемника АИС влияет множество факторов: длина базы антенной системы, шумовые характеристики приемника, формат сообщений АИС, расстояние до передатчика, качка судна, ошибки длины базы антенной системы (температурные флуктуации, точность установки), погрешность определения курса судна и др. В данном разделе рассматривается влияние первых трех.

Для расчета точности пеленгации использовалось численное моделирование по следующей схеме (рис. 2). Формируется сигнал АИС с модуляцией GMSK, кодированием NRZI и скоростью передачи данных 9600 бит/с, содержащий случайный

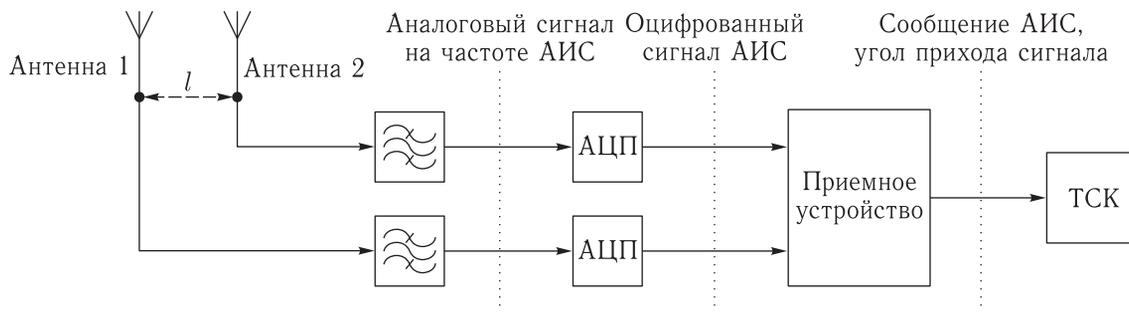


Рис. 1. Схема приемника АИС с функцией определения угла прихода сигнала АИС

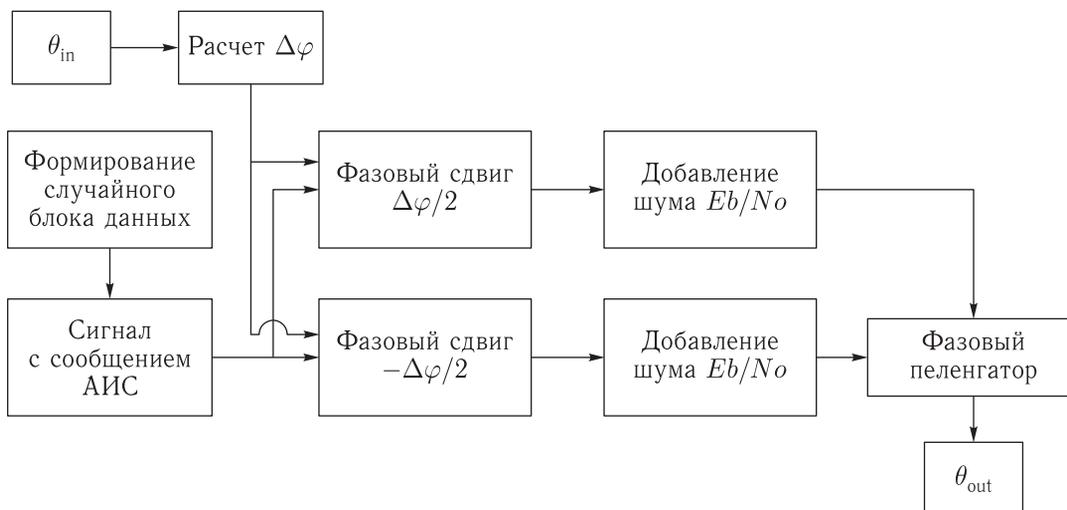


Рис. 2. Блок-схема модели системы пеленгации сигналов АИС

блок данных [6]. Данный сигнал дублируется, каждый сигнал независимо суммируется с белым шумом, задаваемым отношением энергии бита к спектральной плотности мощности E_b/N_0 . Нижний порог E_b/N_0 , при котором возможен прием сообщений АИС, определен в [6] и составляет 10 дБ. Далее осуществляется фазовый сдвиг первого сигнала на $\Delta\varphi/2$, а второго — на $-\Delta\varphi/2$. $\Delta\varphi$ рассчитывается исходя из предварительно заданного угла прихода радиосигнала $\theta_{in} = [-\pi/2 \dots \pi/2]$ по формуле

$$\Delta\varphi = 2\pi l/\lambda \cdot \sin(\theta_{in}).$$

Фазовый пеленгатор построен по схеме с суммарно-разностной обработкой [3]. Длина сигнала, на которой при моделировании производится расчет угла прихода радиосигнала θ_{out} , имеет длину 224 бита и состоит из настроечной последовательности (24 бита), указателя начала (8 бит), блока

данных (184 бит) и указателя конца сообщения АИС (8 бит).

Результаты моделирования определения θ_{out} для 75 тыс. случайных сообщений при длине базы $l = \lambda/2$ и $l = \lambda$, $E_b/N_0 = 10$ дБ и 20 дБ для каждого θ_{in} с шагом 5° представлены на рис. 3. На графиках отмечены средние ошибки ζ_{out} определения угла θ_{out} в зависимости от θ_{in} .

При длине базы $l = \lambda/2$ точность пеленгации сильно зависит от направления на источник сигнала — ошибки сильно растут при приближении θ_{in} к 90° и 270° . Даже при высоком соотношении сигнал/шум ошибки не позволяют уверенно различать разные направления прихода сигналов АИС при $70^\circ < \theta_{in} < 110^\circ$ и $250^\circ < \theta_{in} < 290^\circ$. Для остальных направлений при $E_b/N_0 = 10$ дБ средняя ошибка составляет менее 5° , а для $E_b/N_0 = 20$ дБ — менее 2° .

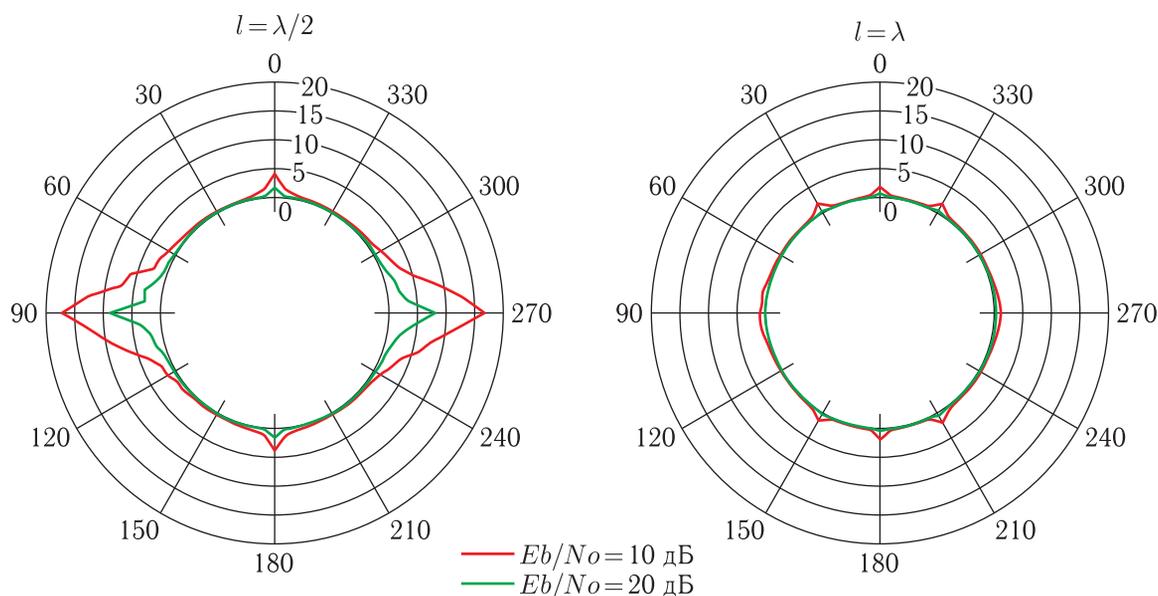


Рис. 3. Средняя ошибка ζ_{out} расчетного направления прихода сигнала θ_{out} в зависимости от действительного направления θ_{in} для сигнала АИС

Использование базы сигнала $l = \lambda$ дает меньшую ошибку и более стабильные характеристики системы пеленгации во всем диапазоне углов. Для $E_b/N_o = 10$ дБ средняя ошибка составляет менее 2° , а для $E_b/N_o = 20$ дБ — менее 1° .

Полученные результаты показывают, что антенная система с длиной базы $l = \lambda$ более предпочтительна для построения системы контроля местоположения судна.

Моделирование ошибки определения координат в зависимости от точности определения углов прихода сигнала

Определение местоположения судна по трем сигналам АИС. Для оценки влияния точности определения углов прихода сигналов на определение координат судна было проведено численное моделирование определения координат методом обратной однократной засечки. Определяемое судно находилось в окружности диаметром 36 км (~ 20 миль). Это в среднем соответствует предельному расстоянию при распространении сигналов АИС между судами. В данную область случайным

образом помещались три судна с известными координатами, определялись углы прихода, в каждый из углов вносилась случайная погрешность до 2° и решалась задача обратной засечки [5]. После расчета определялась ошибка определения координат как расстояние между известной и рассчитанной точками.

Результаты моделирования 10^4 случаев распределения судов (рис. 4) свидетельствуют о том,

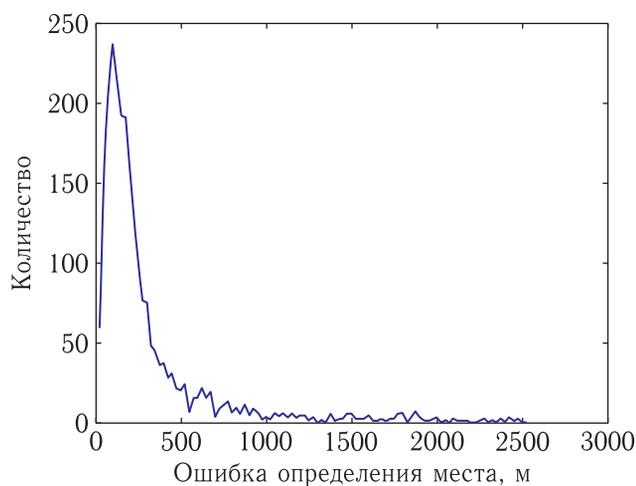


Рис. 4. Зависимость количества измерений от ошибки определения координат при случайной ошибке угла прихода сигнала АИС в пределах 2° для 10^4 измерений

что регистрация трех источников сигнала АИС с ошибкой до 2° позволяет в 85% случаев получить ошибку в определении местоположения судна до 2 км.

Ошибка определения координат уменьшается с повышением точности определения углов прихода и уменьшением среднего расстояния между источниками сигнала и приемником.

Определение местоположения судна по двум сигналам АИС. Определение местоположения судна возможно при наличии двух сигналов АИС и курса движения судна. В этом случае точность определения местоположения зависит от точности определения курса и точности определения углов прихода сигналов АИС. В данном методе могут быть использованы ориентиры (источники сигнала АИС), отстоящие друг от друга на $30\text{--}150^\circ$. Зависимость ошибки определения места от угла между ориентирами (при точности определения 2°), приведенная на рис. 5, показывает, что для рабочего диапазона углов ошибка определения в среднем соответствует 4 км.

Данный метод менее точный, чем обратная засечка, однако условия для его применения встречаются чаще, чем для обратной засечки (см. рис. 6).

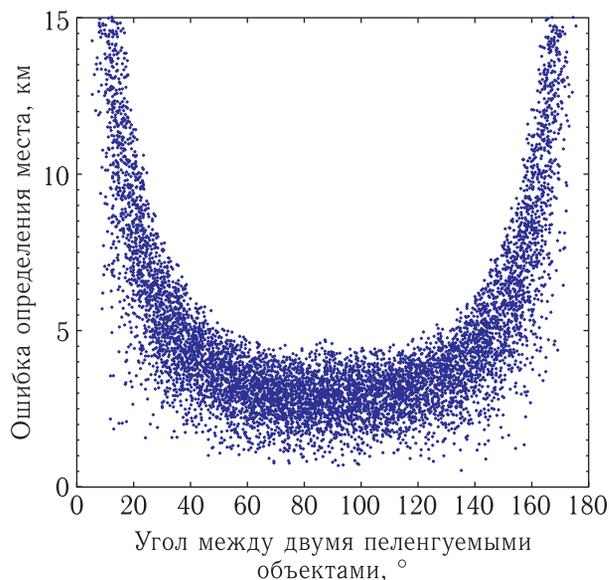
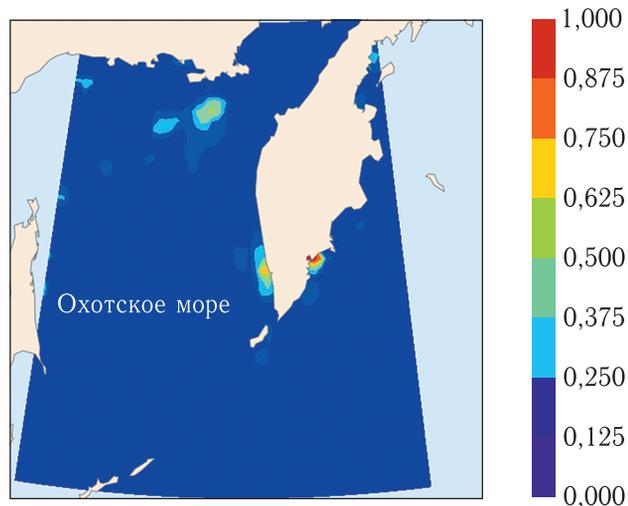
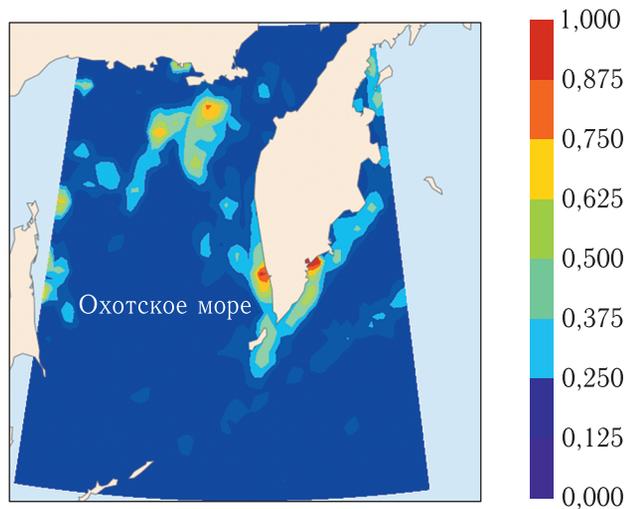


Рис. 5. Зависимость ошибки определения места судна методом пеленга двух ориентиров от угла между объектами при погрешности измерения направлений 2°



a



б

Рис. 6. Карта распределения вероятности наличия сигналов АИС от N судов в акватории Охотского моря: *a*) $N = 3$, *б*) $N = 2$

Определение ложного курса по одному источнику сигнала АИС. При наличии одного сигнала АИС можно осуществить проверку корректности координат и курса судна, определяемых приемником ГЛОНАСС/GPS. Для этого исходя из координат судна-передатчика, содержащихся в сообщении АИС, достаточно рассчитать угол прихода сигнала и сравнить его с измеренным углом. Если измеренный угол не совпадает с рассчитанным с точностью до погрешности, то координаты одного из двух судов неверны. Однозначно определить судно с неправильными координатами

можно при появлении в окрестности других судов: на судне с неправильными координатами будет наблюдаться несоответствие рассчитываемых и определяемых углов прихода сигнала и для других судов.

Оценка вероятности присутствия других судов в окрестности произвольного судна

Для оценки вероятности присутствия двух и более судов в окрестности произвольного судна, необходимых для применения предлагаемого способа, была проведена обработка данных о расположении судов в акваториях Охотского и Берингова морей с ограничениями по широте $45\text{--}60^\circ$ С.Ш. и по долготе $144\text{--}164^\circ$ В.Д. Использовались данные за май–июль 2016 г. [7]. Расчет производился для сетки с шагом $0,33^\circ$. Для каждой точки сетки рассчитывалось отношение дней, в которые было зарегистрировано не менее N судов в радиусе 20 миль от данной точки, к общему количеству дней наблюдения; $N = [2,3]$. В расчете не использовались сигналы береговых станций АИС, имеющих радиус действия порядка 40 миль.

Результаты расчета (рис. 6) показывают, что вероятность регистрации сигналов АИС от трех судов одновременно на уровне единицы в рассматриваемой области существует только в районе Петропавловска-Камчатского. Высокой вероятностью ($> 0,5$) характеризуются основные рыбопромысловые участки Северо-Охотоморской и Западно-Камчатской подзон Охотского моря (рис. 6, а). В остальных акваториях вероятность наличия трех сигналов АИС от различных судов менее 0,12.

Аналогичный расчет для вероятности приема сигналов АИС от двух судов (рис. 6, б) показывает, что площадь районов с соответствующей вероятностью увеличивается в среднем в 4,5 раза. Районы с вероятностью более 0,33 соответствуют районам основного рыбного промысла в Охотоморском бассейне [8].

Заключение

Результаты проведенных исследований подтвердили предположение авторов, что использование сигналов АИС от других судов и специальная приемная система дают возможность определять местоположение судна при выполнении ряда условий.

Численное моделирование приемного устройства показало, что система из двух антенн, разнесенных на λ , позволяет методом фазовой радиопеленгации определять угол прихода сигнала АИС с точностью $1\text{--}2^\circ$. Измеренные с такими погрешностями направления приходов сигналов АИС дают возможность при наличии двух сигналов определять местоположение судна с точностью 2–4 км, а при наличии трех сигналов — 1–2 км. В районах интенсивного рыболовства вероятность определения местоположения судна по сигналам двух судов составляет более 33%.

В случаях когда имеется только один сигнал АИС, может быть использован метод детектирования ложного курса. Все методы должны работать в едином устройстве, применяться в зависимости от обстановки и выдавать в ТСК данные о положении судна с соответствующей точностью.

Предлагаемый способ определения координат судна может быть применен при проектировании усовершенствованного ТСК для использования в фискальных системах контроля местоположения судов, в частности для детектирования локальной подмены навигационного поля ГНСС, а также для определения местоположения судна при отключении судового транспондера АИС.

Список литературы

1. Пырков В.Н., Солодилов А.В., Дегай А.Ю. Отраслевая система мониторинга водных биологических ресурсов, наблюдения и контроля за деятельностью судов рыбопромыслового флота (ОСМ) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2015, т. 12, № 5. С. 251–262.
2. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13 июля 2016 г. № 294 «Об утверждении Порядка оснащения судов техническими средствами контроля и их видов» (не вступил в силу). <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71439614/> (Дата обращения 14.05.2019).

3. Тимофеев В.А. Амплитудные и фазовые методы определения углового положения источника электромагнитных волн: Метод. указания по выполнению лабораторной работы. Ярославль: ЯрГУ, 2006. 56 с.
4. Рудьков Д.И. Навигация и лоция. М.: Транспорт, 1973. 232 с.
5. Кусов В.С. Геодезия и основы аэрометодов. М.: Изд-во Московского Университета, 1995. 160 с.
6. МСЭ-Р М.1371-5 (02/2014) «Технические характеристики автоматической системы опознавания, использующей многостанционный доступ с временным разделением в полосе ОВЧ морской подвижной службы». https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1371-5-201402-I!!PDF-R.pdf (Дата обращения 14.05.2019).
7. Кузнецов А.М., Трусов С.В., Барабошкин О.И., Бобровский С.А., Романов А.А., Романов А.А. Анализ результатов, полученных за три года работы аппаратуры мониторинга судов БРК АИС, размещенной на КА «Ресурс-П» №2 // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 4. С. 80–87.
8. Обзор снюрреводного промысла в период с 5 по 11 марта 2012 года. http://www.kamniro.ru/presscenter/obzory_promysla/promysel/obzory_promysla3 (Дата обращения 14.05.2019).