

МАТРИЦА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИНФОРМАЦИОННОГО КАНАЛА ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ НАБЛЮДЕНИИ НАВИГАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПУТИ СУДНА

*Институт проблем регистрации информации НАН Украины, г. Киев, Украина

**Национальный университет «Одесская национальная морская академия», г. Одесса, Украина

Анотація. У статті проведено аналіз впливу середовища на точність радіолокаційних поляризаційних вимірювань у певній частині радіолокаційного каналу, пов'язаних із випромінюванням і прийомом антеною суднової радіолокаційної станції (РЛС) високочастотних радіолокаційних поляризаційних сигналів, що поширюються в середовищі від антени до навігаційного об'єкта і назад. При наявності певної інформації про навігаційний об'єкт спрощується реалізація вимірювання матриць прямого або зворотного поширення. Чим більше у радіолокаційної системи семантики і прагматики, тим більше підстав для аналізу радіолокаційного інформаційного каналу, тим міцніше зв'язок між радіолокаційним судновим комплексом і середовищем поширення електромагнітної хвилі. Семантика системи сигналів стосовно до суднової РЛС відповідає апріорній інформації про співвіднесення джерела сигналів від навігаційних об'єктів, фонових сигналів і завад з параметрами оброблюваного луна-сигналу об'єкта, що і визначає процедуру формування радіолокаційних характеристик навігаційних об'єктів. Показано, що якщо пряма або зворотна матриця поширення визначена, то простіше визначається і матриця розсіювання навігаційного об'єкта. Використання матричних представлень при описі поляризаційного стану падаючої на навігаційний об'єкт і розсіяної від нього хвилі за допомогою чотирьох дійсних параметрів Стокса дозволило встановити ступінь впливу умов поширення радіолокаційних сигналів на точність вимірювання радіолокаційних характеристик навігаційних об'єктів.

Ключові слова: суднова РЛС, матриця поширення радіолокаційного каналу, електромагнітна хвиля, поляризаційні параметри Стокса, навігаційний об'єкт, ефективна площа розсіювання, коефіцієнти матриці, антена суднової РЛС.

Аннотация. В статье проведен анализ влияния среды на точность радиолокационных поляризационных измерений в определенной части радиолокационного канала, связанных с излучением и приемом антенной судовой радиолокационной станции (РЛС) высокочастотных радиолокационных поляризационных сигналов, распространяющихся в среде от антенны до навигационного объекта и обратно. При наличии определенной информации о навигационном объекте упрощается реализация измерения матриц прямого или обратного распространения. Чем больше у радиолокационной системы семантики и прагматики, тем больше оснований для анализа радиолокационного информационного канала, тем прочнее и крепче связи между радиолокационным судовым комплексом и средой распространения электромагнитной волны. Семантика системы сигналов применительно к судовой РЛС соответствует априорной информации о соотношении источников сигналов от навигационных объектов, фоновых сигналов и помех с параметрами обрабатываемого эхо-сигнала объекта, что и определяет процедуру формирования радиолокационных характеристик навигационных объектов. Показано, что если прямая или обратная матрица распространения определена, то проще определяется и матрица рассеяния навигационного объекта. Использование матричных представлений при описании поляризационного состояния падающей на навигационный объект и рассеянной от него волны с помощью четырех вещественных параметров Стокса позволило установить степень влияния условий распространения радиолокационных сигналов на точность измерения радиолокационных характеристик навигационных объектов.

Ключевые слова: судовая РЛС, матрица распространения радиолокационного канала, электромагнитная волна, поляризационные параметры Стокса, навигационный объект, эффективная площадь рассеяния, коэффициенты матрицы, антенна судовой РЛС.

Abstract. The article analyzes the effect of surrounding at accuracy of radar-location polarization measurements in a certain part of the radar-location channel associated with the radiation and reception of

antenna shipboard radar-location station (RLS) of high frequency polarization radar-location signals spreading in the surrounding from the antenna to the navigation object and back. If there is certain information about the navigation object, it is easy to realize the measurement of the matrices of forward or backward propagation. The more radar-location system has semantics and pragmatics, the more reasons for analyzing radar-location information channel, the firmer and stronger connections between the radar-location shipboard complex and surrounding of electromagnetic wave spreading. Signals semantic system applied to the ship RLS corresponds to a priori information about the correlation of source signals from navigation objects, background signals and noise parameters to be treated of the echo signal, which determines the characteristics of the procedure of radar-location navigation objects. It is shown that if the direct or inverse distribution matrix is defined, so the scattering matrix of the navigation object is determined easily. Using matrix representations describing the polarization state of incident on a navigation object, and the scattered waves from it using four real Stokes parameters gave an opportunity to establish the degree of influence of the radar signal propagation conditions on the accuracy of measurement of the characteristics of radar-location navigation objects.

Keywords: *ship RLS, radar-location channel distribution matrix, electromagnetic wave, Stokes polarization parameters, navigation object, effective scattering area, matrix coefficients, ship radar antenna.*

1. Введение

В настоящее время на судах морского флота наряду с использованием систем спутниковой навигации типа GPS или GLONASS (Global Navigation Satellite Systems) используется радиолокационная система, что соответствует положениям международной конвенции SOLAS (Safety of Life at Sea) (Правило19) [1], International Maritime Organization (ИМО – международная морская организация), разработаны эксплуатационные требования к радиолокационному оборудованию, перечень которых изложен в эксплуатационных требованиях к судовым РЛС (Резолюция MSC 64.(67), 1966, Приложение), Эксплуатационные требования к средствам автоматической радиолокационной прокладки (САРП) (Резолюция А.823(19, 1995), Эксплуатационные требования к РЛС для скоростных судов (Резолюция А.820(19, 1995)). В марте 2003 года на 49 сессии судового комитета по безопасности предложен проект новых общих стандартов радиолокационного оборудования с перспективой замены устаревшего, эксплуатируемого на судах.

Радиолокационная судовая система является главным средством обеспечения безопасности судоходства, определяющая не только позиционирование судна, но и постоянное дистанционное наблюдение за окружающей обстановкой, в том числе и за опасными явлениями погоды на пути судна. Радиолокационные устройства обнаружения, расчета, визуализации на индикаторах судовых РЛС, осреднения и оценки представляют единый комплекс, служащий средством заблаговременного дистанционного получения данных, необходимых для прогнозирования навигационной обстановки при обеспечении безопасности судоходства в любых неблагоприятных условиях внешней среды. Совместно со спутниковыми радионавигационными системами САРП и автоматической идентификационной системой (АИС) радиолокационный судовый комплекс позволяет предупредить столкновение судов, так как судовая РЛС дает истинное взаимное расположение навигационных объектов и судна в реальных координатах.

Однако радиолокационная информация неотделима от радиолокационного канала: судовая РЛС – среда – навигационный объект – среда – судовая РЛС. Основное негативное влияние на получение радиолокационной информации о навигационном объекте оказывает среда, в которой распространяются электромагнитные волны, несущие информацию о навигационном объекте. Неправильная интерпретация полученной радиолокационной информации в условиях ограниченной видимости приводит к вовлечению в аварию судна. По данным [2], ежегодно терпят кораблекрушение 100 крупных судов и несколько тысяч мелких. Нарушение состояния равновесия между окружающей средой, судном и челове-

ком (экипажем судна) за счет неблагоприятных метеорологических условий приводит к отказам систем управления судном и аварийным морским происшествиям.

Правительством Украины распоряжением от 20 октября 2010 года № 2174-Р одобрена транспортная стратегия Украины на период до 2020 года, которая является целостным системным документом стратегического характера, где определены приоритетные направления развития морского транспорта, в том числе направления обеспечения безопасности мореплавания. К аварийным ситуациям за 2009 год при воздействии неблагоприятных и экстремальных условий погоды относятся 482 случая. Обработанные статистические данные позволяют направить усилия научных исследований к разработке методов и технических средств радиолокационного судового оборудования, повышающих навигационную безопасность и гармонизацию управления движением судна в сложных ситуационных условиях среды. Научные исследования по проблемам безопасности мореплавания включают исследования внешних факторов воздействия среды на радиолокационное обеспечение эффективности судовождения, особенно в условиях его интенсивности при ограниченной видимости и в штормовую погоду. Точность, с которой координаты навигационных объектов позиционируются на экране индикатора судовой РЛС, зависит не только от точности измерительных устройств судовой РЛС, но в большей степени от учета воздействия среды на процесс получения радиолокационной информации о навигационном объекте на пути судна.

К настоящему времени при работе судовой РЛС еще недостаточно освещены вопросы, относящиеся к оценке влияния отражений от атмосферных образований на точность измерения координат, параметров движения, автоматического сопровождения по угловым координатам и дальности навигационных объектов на пути судна, что приводит к ухудшению разрешающей способности судовой РЛС по угловым координатам до 10 %, к ошибке в измерении дальности от нескольких сотен метров до десятков километров и др. навигационным ошибкам. Синтез радиолокационной информации о навигационной ситуации, характеризующей положение судна с учетом воздействия среды относительно программной траектории его движения, повысит безопасность судовождения в сложных ситуационных условиях среды.

Поэтому исследования влияния воздействия внешней среды на радиолокационное наблюдение навигационных объектов является актуальной задачей и представляет цель исследования, выполненного в данной статье.

2. Анализ матрицы распространения радиолокационного информационного канала

При радиолокационном наблюдении навигационных объектов, если бы судовая РЛС при решении радиолокационных задач не нуждалась из-за существующей неопределенности в априорной информации о рассеивающих свойствах навигационных объектов на пути судна, то не было бы необходимости формирования радиолокационного канала, объединяющего судовую РЛС, навигационный объект и трассу распространения электромагнитных волн от антенны до объекта и от объекта до антенны, так как трасса распространения и навигационный объект играли для РЛС роль внешней среды. При прохождении среды изменяется поляризационное состояние электромагнитной волны, отраженной от навигационного объекта. Поэтому возникает необходимость в анализе поляризационной структуры излучаемых и принимаемых антенной судовой РЛС радиолокационных сигналов с использованием параметров Стокса и матрицы Мюллера. Большинство реальных сред имеют электродинамические параметры, соответствующие вещественной симметричной и положительно определенной матрице размером 4×4 в зависимости от выбора зондирующего и рассеянного сигналов.

Будем считать элементы радиолокационного канала линейными, электромагнитную волну на излучение и прием представим поляризационными параметрами Стокса, а рассе-

ивающие свойства среды распространения и навигационного объекта в виде матриц, состоящих из 16 вещественных коэффициентов. Передающая антенна судовой РЛС в общем случае излучает электромагнитную волну эллиптической поляризации, которая распространяется в направлении на навигационный объект. При распространении электромагнитной волны на трассе «антенна – навигационный объект» поляризационные параметры волны в общем случае изменяются. Это изменение представим в виде трех матриц:

$$\begin{bmatrix} I_n \\ Q_n \\ U_n \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & n_{24} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & n_{34} \\ n_{41} & n_{42} & n_{43} & n_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ Q_a \\ U_a \\ V_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

или в виде системы из четырех линейных уравнений:

$$\begin{aligned} I_n &= n_{11}I_a + n_{12}Q_a + n_{13}U_a + n_{14}V_a, \\ Q_n &= n_{21}I_a + n_{22}Q_a + n_{23}U_a + n_{24}V_a, \\ U_n &= n_{31}I_a + n_{32}Q_a + n_{33}U_a + n_{34}V_a, \\ V_n &= n_{41}I_a + n_{42}Q_a + n_{43}U_a + n_{44}V_a, \end{aligned} \quad (2)$$

где I_a, Q_a, U_a, V_a – параметры Стокса на выходе антенны;

I_n, Q_n, U_n, V_n – параметры Стокса волны, прошедшей через среду, физические свойства которой характеризуются коэффициентами матрицы $n_{11} \dots n_{44}$, которую назовем матрицей прямого распространения электромагнитной волны.

Навигационный объект в базисе $[\vec{e}_1, \vec{e}_2]$ будем характеризовать матрицей рассеяния:

$$\sigma_{mn} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Коэффициенты матрицы рассеяния (3) являются эффективными площадями рассеяния объекта. Тогда, с учетом (3), взаимосвязь трех матриц представим в виде

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n \\ Q_n \\ U_n \\ V_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где I_0, Q_0, U_0, V_0 – параметры Стокса электромагнитной волны, отраженной от навигационного объекта.

После перемножения матриц (4) получим следующие четыре линейных уравнения, связывающие параметры Стокса, сформированные навигационным объектом I_0, Q_0, U_0, V_0 с эффективными поверхностями рассеяния объекта $\sigma_{11} \dots \sigma_{44}$ и с параметрами Стокса электромагнитной волны, прошедшей через среду и падающей на объект I_n, Q_n, U_n, V_n :

$$I_0 = \sigma_{11}I_n + \sigma_{12}Q_n + \sigma_{13}U_n + \sigma_{14}V_n,$$

$$Q_0 = \sigma_{21}I_n + \sigma_{22}Q_n + \sigma_{23}U_n + \sigma_{24}V_n, \quad (5)$$

$$U_0 = \sigma_{31}I_n + \sigma_{32}Q_n + \sigma_{33}U_n + \sigma_{34}V_n,$$

$$V_0 = \sigma_{41}I_n + \sigma_{42}Q_n + \sigma_{43}U_n + \sigma_{44}V_n.$$

Линейное преобразование параметров Стокса электромагнитной волны, отраженной от навигационного объекта при обратном распространении через среду к антенне судовой РЛС, запишется в матричной форме следующим образом:

$$\begin{bmatrix} I'_n \\ Q'_n \\ U'_n \\ V'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n'_{11} & n'_{12} & n'_{13} & n'_{14} \\ n'_{21} & n'_{22} & n'_{23} & n'_{24} \\ n'_{31} & n'_{32} & n'_{33} & n'_{34} \\ n'_{41} & n'_{42} & n'_{43} & n'_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Из (6) параметры Стокса при обратном распространении электромагнитной волны от навигационного объекта до антенны судовой РЛС можно представить в виде четырех линейных уравнений:

$$I'_n = n'_{11}I_0 + n'_{12}Q_0 + n'_{13}U_0 + n'_{14}V_0,$$

$$Q'_n = n'_{21}I_0 + n'_{22}Q_0 + n'_{23}U_0 + n'_{24}V_0, \quad (7)$$

$$U'_n = n'_{31}I_0 + n'_{32}Q_0 + n'_{33}U_0 + n'_{34}V_0,$$

$$V'_n = n'_{41}I_0 + n'_{42}Q_0 + n'_{43}U_0 + n'_{44}V_0.$$

Таким образом, матрицы прямого и обратного распространения в совокупности с матрицей рассеяния навигационного объекта, а также с параметрами приемо-передающей антенны связывают между собой сигналы на входе приемника и выходе передающего устройства судовой РЛС в соответствии с выражением

$$V = \vec{H}'_a [n'_{mn}] [\sigma_{mn}] [n_{mn}] \cdot \vec{H}_a, \quad (8)$$

где \vec{H}'_a – вектор действующей высоты приемной антенны;

\vec{H}_a – вектор действующей высоты передающей антенны.

Совокупность множителей в скобках является матрицей рассеяния радиолокационного канала, которую обозначим через T , то есть

$$[T] = [n'_{mn}] [\sigma_{mn}] [n_{mn}], \quad (9)$$

где $[n_{mn}]$ – матрица прямого распространения;

$[n'_{mn}]$ – матрица обратного распространения.

Или

$$[T] = \begin{bmatrix} n'_{11} & n'_{12} & n'_{13} & n'_{14} \\ n'_{21} & n'_{22} & n'_{23} & n'_{24} \\ n'_{31} & n'_{32} & n'_{33} & n'_{34} \\ n'_{41} & n'_{42} & n'_{43} & n'_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & n_{24} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & n_{34} \\ n_{41} & n_{42} & n_{43} & n_{44} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Как следует из (9) или (10), матрица T определяется всеми элементами, в которых может иметь место преобразование параметров поляризации радиолокационных сигналов.

Так как вся интересующая нас информация об исследуемом навигационном объекте заключена в его матрице рассеяния σ_{mn} , то эта информация будет получена судовой РЛС с потерями, обусловленными влиянием антенной системы самого судового радиолокатора и среды, в которой распространяются радиолокационные сигналы.

Ошибки, обусловленные влиянием антенны, это ошибки детерминированные, которые могут быть заранее известны и учтены при обработке полученной радиолокационной информации о навигационном объекте. Ошибки же, обусловленные условиями распространения радиолокационных сигналов в среде, заранее полностью известными быть не могут и будут изменяться в зависимости от изменения условий среды на пути распространения радиоволн.

Таким образом, для установления степени влияния условий распространения радиолокационных сигналов на точность измерений радиолокационных характеристик навигационных объектов необходимо исследовать матрицы прямого и обратного распространения для различных условий среды.

Если же матрицы прямого и обратного распространения обладают свойствами коммутативности, то обе эти матрицы можно объединить в одну, то есть

$$[n_{mn\Sigma}] = [n_{mn}] \cdot [n'_{mn}], \quad (11)$$

которую будем называть полной матрицей распространения или матрицей распространения радиолокационного канала. Так как матрица распространения представляет собой произведение матриц прямого и обратного распространения, то элементы этой матрицы будут определяться выражением

$$n_{mn\Sigma} = \sum_{j=1}^2 n_{nj} \cdot n'_{jn}. \quad (12)$$

Матрицы прямого и обратного распространения могут быть заменены одной матрицей распространения при условии совпадения собственных базисов навигационного объекта и обеих матриц распространения. Однако в общем случае составляющие матрицы T , входящие в (10), не обладают свойством коммутативности, поэтому при анализе влияния условий распространения радиолокационных сигналов на точность измерения матрицы распространения навигационных объектов (3) необходимо отдельно исследовать как матрицу прямого, так и матрицу обратного распространения.

Так как судовая РЛС использует одну и ту же антенну на излучение и прием (однопозиционная локация) [3–5], то отраженные от навигационного объекта сигналы будут проходить от антенны до навигационного объекта и от навигационного объекта до антенны судовой РЛС один и тот же путь, в результате чего элементы матриц прямого и обратного распространения будут находиться в соотношении

$$\begin{aligned} n'_{11} &= n_{11} & n'_{12} &= n_{21} & n'_{13} &= n_{31} & n'_{14} &= n_{41} \\ n'_{21} &= n_{12} & n'_{22} &= n_{22} & n'_{23} &= n_{32} & n'_{24} &= n_{42} \\ n'_{31} &= n_{13} & n'_{32} &= n_{23} & n'_{33} &= n_{33} & n'_{34} &= n_{43} \\ n'_{41} &= n_{14} & n'_{42} &= n_{24} & n'_{43} &= n_{34} & n'_{44} &= n_{44} \end{aligned} \quad (13)$$

В этом случае параметры Стокса у навигационного объекта и в точке расположения антенны судовой РЛС будут связаны следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} I'_n &= n_{11}I_0 + n_{21}Q_0 + n_{31}U_0 + n_{41}V_0, \\ Q'_n &= n_{12}I_0 + n_{22}Q_0 + n_{32}U_0 + n_{42}V_0, \end{aligned} \quad (14)$$

$$U'_n = n_{13}I_0 + n_{23}Q_0 + n_{33}U_0 + n_{43}V_0,$$

$$V'_n = n_{14}I_0 + n_{24}Q_0 + n_{34}U_0 + n_{44}V_0.$$

Сравнивая (14) и (2), находим, что матрицы прямого и обратного распространения в этом случае по отношению друг к другу оказываются транспонированными.

Таким образом, при однопозиционной локации анализ влияния условий распространения радиолокационных сигналов при наблюдении навигационных объектов судовой РЛС сводится к исследованию лишь матрицы прямого или обратного распространения.

При наличии определенной информации о навигационном объекте радиолокационного наблюдения упрощается реализация измерения матриц прямого или обратного распространения. Чем больше у радиолокационной судовой системы семантики и прагматики, тем больше оснований для анализа радиолокационного информационного канала, тем прочнее и крепче связи между радиолокационным судовым комплексом и внешней средой. Семантика системы сигналов применительно к судовой РЛС соответствует априорной информации о соотношении источников сигналов от навигационного объекта, фоновых сигналов и помех с параметрами обрабатываемого эхо-сигнала, что и определяет процедуру формирования радиолокационных характеристик навигационного объекта. Если прямая или обратная матрица распространения определена, то легко определяется и матрица рассеяния навигационного объекта. Использование матричных представлений при описании поляризационного состояния падающей и рассеянной волн с помощью четырех вещественных параметров Стокса позволяет реализовать процедуру поляризационной селекции навигационного объекта на гидрометеорологическом фоне на пути судна.

3. Выводы

1. Получена и проанализирована матрица распространения радиолокационного канала, позволяющая установить степень влияния условий распространения радиолокационных сигналов на точность измерения радиолокационных характеристик навигационных объектов.
2. Показано, что для судовой РЛС, обладающей однопозиционной локацией, анализ влияния условий распространения радиолокационных сигналов сводится к исследованию лишь матрицы прямого или обратного распространения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. SOLAS Consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974 and its Protocol of 1988: articles, annexes, and certificates – ИМО. – Лондон, 2004. – 566 р.
2. Голиков В.В. Статистика состояния, роста и аварийности мирового флота / В.В. Голиков, К.В. Назаренко // Матеріали наук.-метод. конф. «Морський транспорт: управління, економіка, безпека», (Одеса, 23–24 листопада 2010 р.). – Одеса: ОНМА, 2010. – С. 99–105.
3. Песков Ю.А. Использование РЛС в судовождении / Песков Ю.А. – М.: Транспорт, 1986. – 144 с.
4. Кондрашихин В.Т. Определение места судна по импульсным РНС / Кондрашихин В.Т., Топалов В.П., Шевченко А.И. – М.: Транспорт, 1975. – 63 с.
5. Байрашевский А.М. Судовые радиолокационные системы / А.М. Байрашевский, Н.Т. Ничипоренко. – М.: Транспорт, 1982. – 311 с.

Стаття надійшла до редакції 31.01.2018