

## РАДИОЛОКАЦИОННОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ НАВИГАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПУТИ СУДНА ПО ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

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

\*\*Национальный университет «Одесская Национальная Морская Академия», г. Одесса, Украина

**Анотація.** У статті розглянута радіофізична модель відбиваючих властивостей навігаційного об'єкта і метеоутворень, що дозволяє робити радіолокаційне розпізнавання навігаційного об'єкта за наявності метеоутворень за поляризаційними відмінностями відбитих сигналів навігаційного об'єкта і метеоутворення. Надана функціональна схема радіолокаційного макета, що реалізовує процес радіолокаційного розпізнавання шляхом виділення з прийнятого сигналу електромагнітної хвилі колової поляризації, відбитої від навігаційного об'єкта, і електромагнітної хвилі еліптичної поляризації, відбитої від метеооб'єкта. Радіолокаційні сигнали, відбиті від навігаційного і метеооб'єктів, параметризовані за допомогою дійсних енергетичних параметрів Стокса, що дозволило спростити систему обробки. Надані радіолокаційна модель і функціональна схема радіолокатора дозволили повною мірою врахувати вплив факторів навколишнього середовища на процес радіолокаційного розпізнавання навігаційних об'єктів.

**Ключові слова:** радіофізична модель, параметри Стокса, морська поверхня, еліптична і кругова поляризації, матриця розсіювання, функціональна схема.

**Аннотация.** В статье рассмотрена радиофизическая модель отражающих свойств навигационного объекта и метеообразования, позволяющая производить радиолокационное распознавание навигационного объекта при наличии метеообразований по поляризационным различиям отраженных сигналов навигационного объекта и метеообразования. Представлена функциональная схема радиолокационного макета, реализующего процесс радиолокационного распознавания путем выделения из принятого сигнала электромагнитной волны круговой поляризации, отраженной от навигационного объекта, и электромагнитной волны эллиптической поляризации, отраженной от метеообъекта. Радиолокационные сигналы, отраженные от навигационного и метеообъектов, параметризованы с помощью действительных энергетических параметров Стокса, что позволило упростить систему обработки. Представленная радиолокационная модель и функциональная схема радиолокатора позволили в полной мере учесть влияние факторов окружающей среды на процесс радиолокационного распознавания навигационных объектов.

**Ключевые слова:** радиофизическая модель, параметры Стокса, морская поверхность, эллиптическая и круговая поляризации, матрица рассеяния, функциональная схема.

**Abstract.** The article considers the radio physical model of the reflective properties of the object navigation and meteorological formations, allowing navigation radar detection of an object in the presence of airborne moisture targets on the polarization differences of the reflected signals from a navigation object and meteorological formations. It is given a functional scheme of the radar layout that implements the process of radar recognition by separating from a received signal of an electromagnetic wave of circular polarization reflected from the navigation object and the electromagnetic wave of elliptic polarization of the reflected from meteorological object. Radar signals reflected from navigation and meteorological objects parameterized with a valid energy of the Stokes parameters, which allowed simplifying the processing system. The presented radar model and functional scheme of the radar allowed fully taking into account the influence of environmental factors on the process of radar detection of navigational objects.

**Keywords:** radio physical model, Stokes parameters, sea surface, elliptical and circular polarization, scattering matrix, functional scheme.

## 1. Введение

Судовая радиолокационная станция (РЛС) должна обладать возможностью выделения эхо-сигнала навигационного объекта (встречные суда) из эхо-сигнала морской поверхности и эхо-сигналов метеообъектов (туман, дождь, снегопад). Сложность выделения эхо-сигнала навигационного объекта состоит в различии уровней эхо-сигналов при малых углах скольжения (угла между отраженным радиолучом и морской поверхностью в точке отражения). На индикаторах судовых РЛС отражённые сигналы дают засветки в виде ложных объектов, что снижает безопасность судовождения при использовании радиолокационной информации.

Существующие методы использования формы сигнала со сжатием импульсов (уменьшением величины элемента разрешения), повышения разрешающей способности судовой РЛС, плотности вероятности отражения объектов, интегрирования декоррелированных (нарушения корреляционных связей помех от моря) радиолокационных отражений (переотражение энергии радиоволны в направлении судовой РЛС) от морской поверхности за счет вращения антенны судовой РЛС со скоростью 600 об/мин и повышения частоты следования излучаемых импульсов до 5000 Гц, селекции по доплеровской частоте, разбиения спектра сигнала на ряд узких интервалов с последующей их декорреляцией, широкополосной некогерентной обработкой сигнала не позволяют пока решить существующую проблему в окончательном виде. В то же время существующие данные по отражению радиолокационного сигнала, излучаемого судовой РЛС от морской поверхности, не обладают большой точностью [1].

К настоящему времени разработаны различные модели отражающих свойств морской поверхности, рассмотренные в [2], к которым относятся:

- фасетная модель, основанная на действительной диаграмме переизлучения радиоволн конечной длины фасетами конечных размеров с учетом влияния длины волны на эффективное число фасетов, формирующих эхо-сигнал;
- модель Кирхгофа-Гюйгенса, основанная на равенстве токов, текущих в каждой точке искривленной поверхности и текущих на плоской поверхности;
- сферическая модель неровной поверхности и модель зеркально отражающих элементов поверхности, основанные на отражении сигнала совокупностью почти изотропных рассеивающих элементов, между которыми расположено множество небольших плоских площадок, ориентированных под различными углами.

Несмотря на использование различных моделей отражающей морской поверхности и разнообразных методов расчета рассеянного поля, теоретические исследования позволяют только в какой-то степени понять явления, происходящие при рассеянии радиоволн реальными морскими поверхностями. Кроме того, не поддается оценке влияние рассеяния радиоволн под поверхностными слоями, которых достигает падающее радиолокационное излучение.

Целью статьи является разработка радиофизической модели отражения радиолокационного сигнала, излучаемого судовой РЛС при наблюдении навигационных объектов с учетом отражения от морской поверхности и метеообъектов.

## 2. Радиолокационное распознавание навигационных объектов при наличии отражений от водной поверхности и гидрометеоров

Будем исходить из того факта, что молекулы воды обладают постоянным дипольным моментом и оказывают влияние на процесс взаимодействия электромагнитного излучения с морской поверхностью [3].

Морская поверхность характеризуется таким радиофизическим параметром, как диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$ . В связи с тем, что процесс рассеяния электромагнитных

волн, излучаемых антенной судовой РЛС, определяется многими факторами и одновременный учет которых практически невозможен, поэтому особо важная роль в процессе отражения электромагнитных волн от морской поверхности отводится ее радиофизическим параметрам и поляризационным характеристикам электромагнитной волны. С целью получения радиолокационной информации о морской поверхности как рассеивателе электромагнитной волны с изменяющимися диэлектрическими свойствами (наличие объекта на ее поверхности с другими диэлектрическими параметрами) возникает необходимость в разработке радиофизической модели отражающих свойств морской поверхности, которая до настоящего времени не рассматривалась. Радиофизическая модель отражающих свойств морской поверхности основывается на взаимосвязи поляризационных параметров облучаемой и отраженной от морской поверхности электромагнитной волны с ее радиофизическими параметрами. Так как все измерения проводятся на фоне мешающих отражений, то очень важной задачей является выбор таких поляризационных параметров электромагнитной волны, которые в заданном направлении позволят получать необходимую информацию о рассеивающих свойствах морской поверхности при отсутствии и наличии на ней навигационных объектов.

Рассмотрим гладкую морскую поверхность, которая имеет зеркальное отражение падающей на нее электромагнитной волны.

Антенна РЛС излучает электромагнитную волну круговой поляризации правого или левого направления вращения электрического вектора. Считаем, что тропосфера чистая, без облаков и осадков, относительная диэлектрическая проницаемость которой  $\epsilon_T \approx 1$ . Морская поверхность изотропная и имеет действительное значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon^{МП}$ .

Будем представлять электромагнитную волну на излучение и прием поляризационными параметрами Стокса. Отражающие свойства морской поверхности представим матрицей рассеяния, состоящей из 16-ти вещественных коэффициентов.

Тогда взаимодействие параметров излученной и отраженной от морской поверхности электромагнитной волны с радиофизическими параметрами отражающей морской поверхности запишется в виде следующего матричного уравнения [3]:

$$\begin{bmatrix} I_{отр} \\ Q_{отр} \\ U_{отр} \\ V_{отр} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^{МП} & \epsilon_{12}^{МП} & \epsilon_{13}^{МП} & \epsilon_{14}^{МП} \\ \epsilon_{21}^{МП} & \epsilon_{22}^{МП} & \epsilon_{23}^{МП} & \epsilon_{24}^{МП} \\ \epsilon_{31}^{МП} & \epsilon_{32}^{МП} & \epsilon_{33}^{МП} & \epsilon_{34}^{МП} \\ \epsilon_{41}^{МП} & \epsilon_{42}^{МП} & \epsilon_{43}^{МП} & \epsilon_{44}^{МП} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{изл} \\ 0 \\ 0 \\ V_{изл} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $I_{отр}$ ,  $Q_{отр}$ ,  $U_{отр}$ ,  $V_{отр}$ ,  $I_{изл}$ ,  $V_{изл}$  – параметры Стокса отражаемой и излучаемой электромагнитной волны соответственно.

Так как гладкая морская поверхность не изменяет поляризацию отраженной электромагнитной волны, тогда уравнение (1) запишется в виде

$$\begin{bmatrix} I_{отр} \\ 0 \\ 0 \\ V_{отр} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^{МП} & \epsilon_{12}^{МП} & \epsilon_{13}^{МП} & \epsilon_{14}^{МП} \\ \epsilon_{21}^{МП} & \epsilon_{22}^{МП} & \epsilon_{23}^{МП} & \epsilon_{24}^{МП} \\ \epsilon_{31}^{МП} & \epsilon_{32}^{МП} & \epsilon_{33}^{МП} & \epsilon_{34}^{МП} \\ \epsilon_{41}^{МП} & \epsilon_{42}^{МП} & \epsilon_{43}^{МП} & \epsilon_{44}^{МП} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{изл} \\ 0 \\ 0 \\ V_{изл} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

После перемножения матриц правой части получим следующие два линейных уравнения:

$$I_{omp} = \varepsilon_{11}^{МП} I_{изл} + 0 + 0 + \varepsilon_{14}^{МП} V_{изл}, \quad (3)$$

$$V_{omp} = \varepsilon_{41}^{МП} I_{изл} + 0 + 0 + \varepsilon_{44}^{МП} V_{изл}. \quad (4)$$

С учетом того, что  $I_{изл} = V_{изл}$ , уравнения (3) и (4) запишутся в виде

$$I_{omp} = I_{изл} (\varepsilon_{11}^{МП} + \varepsilon_{14}^{МП}), \quad (5)$$

$$V_{omp} = I_{изл} (\varepsilon_{41}^{МП} + \varepsilon_{44}^{МП}). \quad (6)$$

Но так как  $\varepsilon_{11}^{МП} = \varepsilon_{14}^{МП} = \varepsilon_{41}^{МП} = \varepsilon_{44}^{МП}$ , тогда

$$I_{omp} = \varepsilon^{МП} I_{изл}, \quad (7)$$

$$V_{omp} = \varepsilon^{МП} I_{изл}. \quad (8)$$

Так как морская поверхность не изменяет поляризацию падающей на нее электромагнитной волны, тогда уравнения (7) и (8) отраженной волны в окончательном виде запишутся в виде одного линейного уравнения:

$$I_{omp} = \varepsilon^{МП} I_{изл}. \quad (9)$$

Измерив  $I_{отр}$  с помощью судовой РЛС, делаем вывод о том, что в зоне действия судовой РЛС отсутствуют навигационные объекты, так как  $\varepsilon^{МП}$  известна.

При условии, что морская поверхность гладкая и имеет зеркальное отражение, а в зоне обнаружения на ней присутствуют навигационные объекты, имеющие  $\varepsilon^{ОБ} \neq \varepsilon^{МП}$ , тогда для данной ситуации уравнение (1) запишется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} I_{omp} \\ Q_{omp} \\ U_{omp} \\ V_{omp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^{МП} + \varepsilon_{11}^{ОБ} \varepsilon_{12}^{МП} + \varepsilon_{12}^{ОБ} \varepsilon_{13}^{МП} + \varepsilon_{13}^{ОБ} \varepsilon_{14}^{МП} + \varepsilon_{14}^{ОБ} \\ \varepsilon_{21}^{МП} + \varepsilon_{21}^{ОБ} \varepsilon_{22}^{МП} + \varepsilon_{22}^{ОБ} \varepsilon_{23}^{МП} + \varepsilon_{23}^{ОБ} \varepsilon_{24}^{МП} + \varepsilon_{24}^{ОБ} \\ \varepsilon_{31}^{МП} + \varepsilon_{31}^{ОБ} \varepsilon_{32}^{МП} + \varepsilon_{32}^{ОБ} \varepsilon_{33}^{МП} + \varepsilon_{33}^{ОБ} \varepsilon_{34}^{МП} + \varepsilon_{34}^{ОБ} \\ \varepsilon_{41}^{МП} + \varepsilon_{41}^{ОБ} \varepsilon_{42}^{МП} + \varepsilon_{42}^{ОБ} \varepsilon_{43}^{МП} + \varepsilon_{43}^{ОБ} \varepsilon_{44}^{МП} + \varepsilon_{44}^{ОБ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{изл} \\ 0 \\ 0 \\ V_{изл} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

или после перемножения правой части получим

$$I_{omp} = (\varepsilon_{11}^{МП} + \varepsilon_{11}^{ОБ}) I_{изл} + (\varepsilon_{14}^{МП} + \varepsilon_{14}^{ОБ}) V_{изл}, \quad (11)$$

$$Q_{omp} = (\varepsilon_{21}^{МП} + \varepsilon_{21}^{ОБ}) I_{изл} + (\varepsilon_{24}^{МП} + \varepsilon_{24}^{ОБ}) V_{изл}, \quad (12)$$

$$U_{omp} = (\varepsilon_{31}^{МП} + \varepsilon_{31}^{ОБ}) I_{изл} + (\varepsilon_{34}^{МП} + \varepsilon_{34}^{ОБ}) V_{изл}, \quad (13)$$

$$V_{omp} = (\varepsilon_{41}^{МП} + \varepsilon_{41}^{ОБ}) I_{изл} + (\varepsilon_{44}^{МП} + \varepsilon_{44}^{ОБ}) V_{изл}. \quad (14)$$

С учетом того, что  $I_{изл} = V_{изл}$ , уравнения (11–14) переписутся в виде

$$I_{omp} = I_{изл} [(\varepsilon_{11}^{МП} + \varepsilon_{11}^{ОБ}) + (\varepsilon_{14}^{МП} + \varepsilon_{14}^{ОБ})], \quad (15)$$

$$Q_{omp} = I_{изл} [(\varepsilon_{21}^{МП} + \varepsilon_{21}^{ОБ}) + (\varepsilon_{24}^{МП} + \varepsilon_{24}^{ОБ})], \quad (16)$$

$$U_{omp} = I_{изл} [(\varepsilon_{31}^{МП} + \varepsilon_{31}^{ОБ}) + (\varepsilon_{34}^{МП} + \varepsilon_{34}^{ОБ})], \quad (17)$$

$$V_{omp} = I_{изл} \left[ \left( \varepsilon_{41}^{МП} + \varepsilon_{41}^{ОБ} \right) + \left( \varepsilon_{44}^{МП} + \varepsilon_{44}^{ОБ} \right) \right]. \quad (18)$$

Измерив судовой РЛС  $I_{отр}$ ,  $Q_{отр}$ ,  $U_{отр}$ ,  $V_{отр}$ , получим поляризацию отраженной волны, которая отличается от поляризации излучаемой антенной судовой РЛС электромагнитной волны. Вид поляризации отраженной волны по измеренным параметрам Стокса определяется с помощью геометрических характеристик поляризационного эллипса [4]:

$$\alpha = 0,5 \sin^{-1} \frac{V_{omp}}{I_{omp}}, \quad (19)$$

$$\beta = 0,5 \tan^{-1} \frac{U_{omp}}{Q_{omp}}, \quad (20)$$

где  $\alpha$  – угол эллиптичности поляризационного эллипса отраженной волны;  
 $\beta$  – угол ориентации поляризационного эллипса.

По измеренным параметрам Стокса вид поляризации отраженной волны легко определяется также по двум ортогональным амплитудам отраженной волны и разнице фаз между ними:

$$E_{x_{omp}} = \sqrt{\frac{I_{omp} + Q_{omp}}{2}}, \quad (21)$$

$$E_{y_{omp}} = \sqrt{\frac{I_{omp} - Q_{omp}}{2}}, \quad (22)$$

$$\Phi_{xy_{omp}} = \tan^{-1} \frac{V_{omp}}{U_{omp}}. \quad (23)$$

где  $E_{x_{omp}}$ ,  $E_{y_{omp}}$  – ортогональные амплитуды отраженной волны;

$\Phi_{xy_{omp}}$  – разность фаз между ортогональными амплитудами отраженной волны;

$I_{отр}$ ,  $Q_{отр}$ ,  $U_{отр}$ ,  $V_{отр}$  – измеренные параметры Стокса отраженной волны.

Если  $E_{x_{omp}} = E_{y_{omp}}$  и  $\Phi_{xy_{omp}} = 90^\circ$  – поляризация отраженной волны круговая.

Если  $E_{x_{omp}} \neq E_{y_{omp}}$ , а  $\Phi_{xy_{omp}} \neq 90^\circ$  – поляризация отраженной волны эллиптическая.

При наличии навигационного объекта в зоне обнаружения судовой РЛС, диэлектрическая проницаемость которого отлична от диэлектрической проницаемости морской поверхности, поляризация отраженной электромагнитной волны от области морской поверхности с объектом будет эллиптической, с определенными значениями геометрических параметров поляризационного эллипса  $\alpha$  и  $\beta$ , что указывает на присутствие объекта на гладкой морской поверхности.

Наиболее перспективным видом поляризации для использования в судовых РЛС является круговая поляризация на излучение, позволяющая реализовать одновременно преимущества обоих видов и получить возможность распознать на индикаторе эхо-сигнал объекта, так как отраженная волна будет иметь эллиптическую поляризацию, соответствующую эхо-сигналу объекта и морской поверхности, но с другими значениями  $\alpha$  и  $\beta$ .

При наличии на пути распространения радиолуча от антенны судовой РЛС до морской поверхности тумана, облаков и осадков (гидрометеоров) уравнение (10) запишется в виде

$$\begin{bmatrix} I_{omp} \\ Q_{omp} \\ U_{omp} \\ V_{omp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^{МП} + \varepsilon_{11}^{ОБ} + \varepsilon_{11}^{ГМ} & \varepsilon_{12}^{МП} + \varepsilon_{12}^{ОБ} + \varepsilon_{12}^{ГМ} & \varepsilon_{13}^{МП} + \varepsilon_{13}^{ОБ} + \varepsilon_{13}^{ГМ} & \varepsilon_{14}^{МП} + \varepsilon_{14}^{ОБ} + \varepsilon_{14}^{ГМ} \\ \varepsilon_{21}^{МП} + \varepsilon_{21}^{ОБ} + \varepsilon_{21}^{ГМ} & \varepsilon_{22}^{МП} + \varepsilon_{22}^{ОБ} + \varepsilon_{22}^{ГМ} & \varepsilon_{23}^{МП} + \varepsilon_{23}^{ОБ} + \varepsilon_{23}^{ГМ} & \varepsilon_{24}^{МП} + \varepsilon_{24}^{ОБ} + \varepsilon_{24}^{ГМ} \\ \varepsilon_{31}^{МП} + \varepsilon_{31}^{ОБ} + \varepsilon_{31}^{ГМ} & \varepsilon_{32}^{МП} + \varepsilon_{32}^{ОБ} + \varepsilon_{32}^{ГМ} & \varepsilon_{33}^{МП} + \varepsilon_{33}^{ОБ} + \varepsilon_{33}^{ГМ} & \varepsilon_{34}^{МП} + \varepsilon_{34}^{ОБ} + \varepsilon_{34}^{ГМ} \\ \varepsilon_{41}^{МП} + \varepsilon_{41}^{ОБ} + \varepsilon_{41}^{ГМ} & \varepsilon_{42}^{МП} + \varepsilon_{42}^{ОБ} + \varepsilon_{42}^{ГМ} & \varepsilon_{43}^{МП} + \varepsilon_{43}^{ОБ} + \varepsilon_{43}^{ГМ} & \varepsilon_{44}^{МП} + \varepsilon_{44}^{ОБ} + \varepsilon_{44}^{ГМ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{изл} \\ 0 \\ 0 \\ V_{изл} \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где  $\varepsilon^{МП}$  – диэлектрическая проницаемость морской поверхности;

$\varepsilon^{ОБ}$  – диэлектрическая проницаемость навигационного объекта;

$\varepsilon^{ГМ}$  – диэлектрическая проницаемость частиц облаков и осадков.

После перемножения правой части уравнения (24) получаем четыре линейных уравнения в виде

$$I_{omp} = (\varepsilon_{11}^{МП} + \varepsilon_{11}^{ОБ} + \varepsilon_{11}^{ГМ}) I_{изл} + (\varepsilon_{14}^{МП} + \varepsilon_{14}^{ОБ} + \varepsilon_{14}^{ГМ}) V_{изл}, \quad (25)$$

$$Q_{omp} = (\varepsilon_{21}^{МП} + \varepsilon_{21}^{ОБ} + \varepsilon_{21}^{ГМ}) I_{изл} + (\varepsilon_{24}^{МП} + \varepsilon_{24}^{ОБ} + \varepsilon_{24}^{ГМ}) V_{изл}, \quad (26)$$

$$U_{omp} = (\varepsilon_{31}^{МП} + \varepsilon_{31}^{ОБ} + \varepsilon_{31}^{ГМ}) I_{изл} + (\varepsilon_{34}^{МП} + \varepsilon_{34}^{ОБ} + \varepsilon_{34}^{ГМ}) V_{изл}, \quad (27)$$

$$V_{omp} = (\varepsilon_{41}^{МП} + \varepsilon_{41}^{ОБ} + \varepsilon_{41}^{ГМ}) I_{изл} + (\varepsilon_{44}^{МП} + \varepsilon_{44}^{ОБ} + \varepsilon_{44}^{ГМ}) V_{изл} \quad (28)$$

или с учетом того, что  $V_{изл} = I_{изл}$ , получим

$$I_{omp} = I_{изл} \left[ (\varepsilon_{11}^{МП} + \varepsilon_{11}^{ОБ} + \varepsilon_{11}^{ГМ}) + (\varepsilon_{14}^{МП} + \varepsilon_{14}^{ОБ} + \varepsilon_{14}^{ГМ}) \right], \quad (29)$$

$$Q_{omp} = I_{изл} \left[ (\varepsilon_{21}^{МП} + \varepsilon_{21}^{ОБ} + \varepsilon_{21}^{ГМ}) + (\varepsilon_{24}^{МП} + \varepsilon_{24}^{ОБ} + \varepsilon_{24}^{ГМ}) \right], \quad (30)$$

$$U_{omp} = I_{изл} \left[ (\varepsilon_{31}^{МП} + \varepsilon_{31}^{ОБ} + \varepsilon_{31}^{ГМ}) + (\varepsilon_{34}^{МП} + \varepsilon_{34}^{ОБ} + \varepsilon_{34}^{ГМ}) \right], \quad (31)$$

$$V_{omp} = I_{изл} \left[ (\varepsilon_{41}^{МП} + \varepsilon_{41}^{ОБ} + \varepsilon_{41}^{ГМ}) + (\varepsilon_{44}^{МП} + \varepsilon_{44}^{ОБ} + \varepsilon_{44}^{ГМ}) \right]. \quad (32)$$

При положительном значении угла места (в градусах) антенна (одна на излучение и прием) судовой РЛС наблюдает [5] навигационные объекты и гидрометеоры и не наблюдает морскую поверхность. Тогда уравнение (24) запишется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} I_{omp} \\ Q_{omp} \\ U_{omp} \\ V_{omp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^{ОБ} + \varepsilon_{11}^{ГМ} & \varepsilon_{12}^{ОБ} + \varepsilon_{12}^{ГМ} & \varepsilon_{13}^{ОБ} + \varepsilon_{13}^{ГМ} & \varepsilon_{14}^{ОБ} + \varepsilon_{14}^{ГМ} \\ \varepsilon_{21}^{ОБ} + \varepsilon_{21}^{ГМ} & \varepsilon_{22}^{ОБ} + \varepsilon_{22}^{ГМ} & \varepsilon_{23}^{ОБ} + \varepsilon_{23}^{ГМ} & \varepsilon_{24}^{ОБ} + \varepsilon_{24}^{ГМ} \\ \varepsilon_{31}^{ОБ} + \varepsilon_{31}^{ГМ} & \varepsilon_{32}^{ОБ} + \varepsilon_{32}^{ГМ} & \varepsilon_{33}^{ОБ} + \varepsilon_{33}^{ГМ} & \varepsilon_{34}^{ОБ} + \varepsilon_{34}^{ГМ} \\ \varepsilon_{41}^{ОБ} + \varepsilon_{41}^{ГМ} & \varepsilon_{42}^{ОБ} + \varepsilon_{42}^{ГМ} & \varepsilon_{43}^{ОБ} + \varepsilon_{43}^{ГМ} & \varepsilon_{44}^{ОБ} + \varepsilon_{44}^{ГМ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{изл} \\ 0 \\ 0 \\ V_{изл} \end{bmatrix}. \quad (33)$$

После перемножения правой части уравнения (33) получим

$$I_{omp} = (\varepsilon_{11}^{ОБ} + \varepsilon_{11}^{ГМ}) I_{изл} + (\varepsilon_{14}^{ОБ} + \varepsilon_{14}^{ГМ}) V_{изл}, \quad (34)$$

$$Q_{omp} = (\varepsilon_{21}^{ОБ} + \varepsilon_{21}^{ГМ}) I_{изл} + (\varepsilon_{24}^{ОБ} + \varepsilon_{24}^{ГМ}) V_{изл}, \quad (35)$$

$$U_{omp} = (\varepsilon_{31}^{ОБ} + \varepsilon_{31}^{ГМ}) I_{изл} + (\varepsilon_{34}^{ОБ} + \varepsilon_{34}^{ГМ}) V_{изл}, \quad (36)$$

$$V_{omp} = (\varepsilon_{41}^{ОБ} + \varepsilon_{41}^{ГМ}) I_{изл} + (\varepsilon_{44}^{ОБ} + \varepsilon_{44}^{ГМ}) V_{изл} \quad (37)$$

или с учетом того, что  $V_{изл} = I_{изл}$ , получим

$$I_{отр} = I_{изл} \left[ \left( \varepsilon_{11}^{OB} + \varepsilon_{11}^{GM} \right) + \left( \varepsilon_{14}^{OB} + \varepsilon_{14}^{GM} \right) \right], \quad (38)$$

$$Q_{отр} = I_{изл} \left[ \left( \varepsilon_{21}^{OB} + \varepsilon_{21}^{GM} \right) + \left( \varepsilon_{24}^{OB} + \varepsilon_{24}^{GM} \right) \right], \quad (39)$$

$$U_{отр} = I_{изл} \left[ \left( \varepsilon_{31}^{OB} + \varepsilon_{31}^{GM} \right) + \left( \varepsilon_{34}^{OB} + \varepsilon_{34}^{GM} \right) \right], \quad (40)$$

$$V_{отр} = I_{изл} \left[ \left( \varepsilon_{41}^{OB} + \varepsilon_{41}^{GM} \right) + \left( \varepsilon_{44}^{OB} + \varepsilon_{44}^{GM} \right) \right]. \quad (41)$$

Гидрометеоры являются объемно-распределенным объектом, состоящим из большого количества частиц различного размера, ориентации, числа частиц в радиолокационном объеме и фазового состояния. Поэтому эхо-сигнал от такого объекта будет иметь эллиптическую поляризацию.

*Определение.* Навигационные объекты – естественные (морской берег, горы), искусственные (морские и речные суда, буи, бакены, береговые постройки, маяки).

Навигационный объект представляет собой сосредоточенную цель, которая имеет на своей поверхности выпуклые и вогнутые поверхности. Участки этих поверхностей, ориентированные перпендикулярно к радиолучу, действуют как плоские пластины размером порядка зоны Френеля. На двух различных выпуклых или вогнутых поверхностях навигационного объекта выделяются пары плоских участков, перпендикулярных друг другу, образующих двухгранный уголкообразный отражатель, создающий эхо-сигнал круговой поляризации.

При наличии гидрометеоров на пути распространения радиолокационного сигнала эхо-сигнал будет состоять из двух поляризаций: эллиптической и круговой, которые необходимо выделить из суммарного эхо-сигнала. После выделения эхо-сигнала круговой и эллиптической поляризации при радиолокационном наблюдении навигационного объекта эхо-сигнал круговой поляризации используется для наблюдения навигационного объекта, а эхо-сигнал эллиптической поляризации для наблюдения опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевыми облаками. Эти два эхо-сигнала подаются на два индикатора судовой РЛС или один на индикатор для наблюдения навигационного объекта, а другой на дисплей компьютера для наблюдения зоны выпадающих осадков или кучево-дождевых облаков.

Реализация физико-математической модели, связывающей радиофизические параметры объектов наблюдения судовой РЛС на пути судна с параметрами электромагнитной волны, излучаемой антенной, производится с помощью разработанного экспериментального макета, функциональная схема которого представлена на рис. 1.

При создании макета судовой РЛС требовалось учесть ряд важных особенностей, оказывающих существенное влияние на ее функционирование:

- создается электромагнитная волна круговой поляризации на излучение;
- применяется всеполяризованная антенна, позволяющая излучать и принимать электромагнитную волну любой поляризации;
- синхронизируется работа всех узлов в режиме излучения и приема электромагнитной волны;
- передача и обработка радиолокационных сигналов производится в реальном времени;
- выдача результатов обработки радиолокационных сигналов потребителям производится в моменты времени, совпадающие с моментом получения данных измерения и их обработки;

• радиолокационная информация представляется на дисплее компьютера и на экране индикатора радиолокатора в определенном цвете.

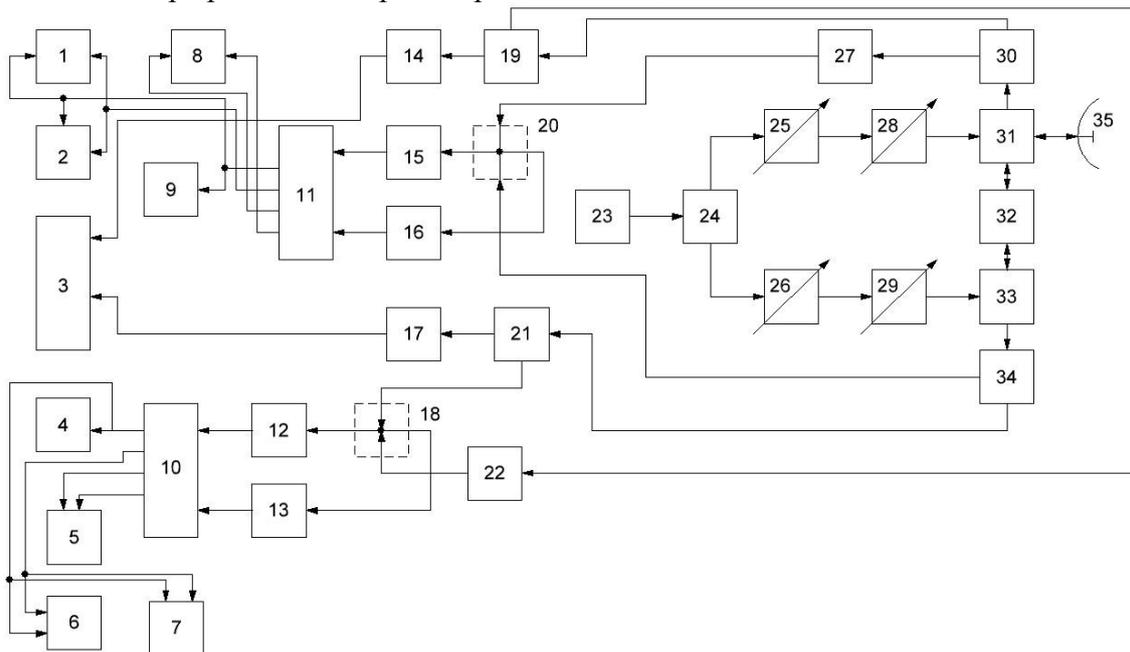


Рис. 1. Функциональная схема экспериментального макета судовой РЛС, реализующая дистанционное распознавание объекта по геометрическим параметрам поляризации: 1, 2 – устройства измерения амплитуд составляющих эхо-сигнала круговой поляризации; 3, 10, 11 – устройства измерения параметров Стокса эхо-сигнала ортогональных компонент в линейном, круговом и эллиптическом базисах; 4, 9 – индикаторы судовой РЛС; 5, 8 – устройства измерения разности фаз эхо-сигналов эллиптической и круговой поляризации; 6, 7 – устройства измерения амплитуд составляющих эхо-сигнала эллиптической поляризации; 12, 13, 14, 15, 16, 17 – приемные устройства; 18, 20 – волноводные Т-мосты; 19, 21, 24, 30, 34 – волноводные делители мощности; 22, 27, 28, 29 – фазовращатели; 23 – передающее устройство; 25, 26 – аттенюаторы; 31, 34 – антенные переключатели; 32 – поляризационный селектор; 35 – всеполяризованная антенна

Указанные особенности судовой РЛС делают задачу создания ее макета задачей нетривиальной и требуют применения специфического подхода и средств.

При этом решена задача выделения из суммарного эхо-сигнала эллиптической поляризации метеорологического объекта и эхо-сигнала круговой поляризации навигационного объекта при их облучении электромагнитной волной круговой поляризации. Создание электромагнитной волны на излучение заданной поляризации сводится к управлению оператором, создающим необходимые поляризационные характеристики у излучаемого сигнала.

Поляризационные свойства антенны определяются разделителем мощности, создающим заданные амплитудные соотношения между ортогональными компонентами электромагнитной волны в двух ортогональных каналах, в каждом из которых включены аттенюаторы и фазовращатели. Всеполяризованная антенна соединяется с двумя ортогональными каналами через поляризационный селектор, выполняющий функцию разделителя и сумматора ортогональных компонент волны при приеме и излучении. В совокупности все эти устройства образуют антенну эллиптической поляризации.

Отраженный суммарный сигнал от метео- и навигационных объектов разделяется по двум приемным каналам. Один из которых выделяет эхо-сигнал круговой поляризации, поступающий от метеообъекта, а другой канал выделяет из суммарного эхо-сигнала, принятого антенной, сигнал эллиптической поляризации. После усиления и преобразования сигналы круговой и эллиптической поляризации подаются на соответствующие индикато-

ры для наблюдения (параметр  $I$ ), а для контроля параметров поляризации отраженной волны от навигационного и метеообъектов – на схемы измерения амплитуд ортогональных компонент и разности фаз между ними.

Круговой поляризации от навигационного объекта будут соответствовать  $E_{кр_1} = E_{кр_2}$  и  $\Phi_{кр} = 90^\circ$ , а эллиптической поляризации от метеообъекта  $E_{эл_1} \neq E_{эл_2}$  и  $\Phi_{эл} = 90^\circ$  или  $E_{эл_1} = E_{эл_2}$  и  $\Phi_{эл} \neq 90^\circ$ . Третий приемный канал позволяет проводить радиолокационное наблюдение в стандартном режиме, но с приемом полной отраженной мощности от гидрометеоров и навигационного объектов.

Рассмотренные в статье материалы были апробированы при проведении исследований в рамках госбюджетной НИР «Теоретические основы гарантированной безопасности судоходства в территориальном море, внутренних водах и портах Украины» (2010–2012 гг.) № ДР 0110U00280, а также 7-ой рамочной транспортной программой Европейского союза проект MOWE – IT «Управление погодными явлениями в транспортной сфере» № ДР 0114U000343 (2012–2014 гг.), грант № 314506.

### 3. Выводы

В результате проделанной работы предложена радиофизическая модель отражающих свойств морской поверхности, гидрометеоров и навигационного объекта, которая дает возможность выделять из суммарного отраженного сигнала сигнал круговой поляризации, принадлежащий навигационному объекту, и сигнал эллиптической поляризации, принадлежащий гидрометеорам, что позволяет произвести радиолокационное распознавание навигационного объекта при наличии метеообразований.

Предложенная функциональная схема судовой РЛС реализует процесс радиолокационного распознавания навигационных объектов при наличии метеообразований (тумана, дождя, снега) на пути судна. Реализация физико-математической модели, связывающей радиофизические параметры объектов наблюдения судовой РЛС на пути судна с параметрами электромагнитной волны, излучаемой антенной, производится с помощью разработанного экспериментального макета, подтверждает ее адекватность, что позволяет использовать данную модель для исследования, разработки и усовершенствования алгоритмов работы РЛС. Алгоритмы обработки данных, реализуемые в рамках данной модели, могут быть достаточно легко преобразованы в программный код для реального процессора обработки данных и управления, что является дополнительным положительным качеством данной модели.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности распространения радиоволн над морской поверхностью / [Ерёмка В.Д., Кабанов В.А., Логвинов Ю.Ф. и др.]; под ред. В.Б. Разказовского. – Севастополь: Вебер, 2013. – 217 с.
2. Справочник по радиолокации [под общей ред. К.Н. Трофимова]. – М.: Советское радио, 1976. – Т. 1: Основы радиолокации. – 456 с.
3. Розенберг В.И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами / Розенберг В.И. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 348 с.
4. Павлов Н.Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности / Павлов Н.Ф. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 431 с.
5. Князь А.И. Совершенствование методов и средств дистанционного наблюдения навигационных объектов на пути судна: дис. ... канд. техн. наук. – Одесса, 2015. – 196 с.

*Стаття надійшла до редакції 18.09.2017*