

УДК 551.508.85 (551.576 +551.577)

**В. Г. Пуятин<sup>1</sup>, Д. В. Корбан<sup>2</sup>, А. И. Князь<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт проблем регистрации информации НАН Украины  
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

<sup>2</sup>Национальный университет «Одесская Морская Академия»  
ул. Дидрихсона, 8, 65029 Одесса, Украина

## **Влияние атмосферных условий на радиолокационное наблюдение навигационных объектов**

*Проведено теоретическое исследование влияния однородной, турбулентной среды и среды с метеообразованиями на распространение электромагнитных волн, проходящих через эти среды при радиолокационном наблюдении навигационных объектов судовой радиолокационной станцией (РЛС). Использование матриц прямого и обратного распространения приводит к упрощению синтеза изменения параметров электромагнитной волны, в зависимости от состояния среды при дистанционном получении информации о навигационном объекте.*

**Ключевые слова:** *навигационный объект, судовая РЛС, матрица распространения, электромагнитная волна, среда распространения, коэффициент ослабления, турбулентная среда, градиент диэлектрической проницаемости, коэффициенты матрицы, статистическая матрица, детерминированная матрица, метеорологические образования.*

### **1. Введение**

В работах [1, 3, 5–10] исследуются внешние факторы, влияющие на поляризационные характеристики радиолокационных целей. В [2, 4] исследованы методы и рассмотрен принцип построения технических средств радиолокационного наблюдения навигационных объектов. Приведены экспериментальные результаты измерения параметров Стокса в различных метеообразованиях, позволяющие провести их дистанционное распознавание на индикаторах судовой РЛС.

Недостатком рассмотренных методов дистанционного наблюдения навигационных объектов на пути судна является то, что они не учитывают влияния конкретной среды (однородной, турбулентной и с метеорологическими образованиями), имеющей свои специфические особенности влияния на процессы радиолокационного наблюдения объектов, что в значительной степени снижает эффективность судовых радиолокационных комплексов.

© В. Г. Пуятин, Д. В. Корбан, А. И. Князь

Целью статьи является исследование влияния среды на процессы распространения через нее электромагнитных волн.

## 2. Исследование влияния среды на распространение электромагнитной волны при радиолокационном наблюдении навигационных объектов

При проведении исследований используем компактный матричный формализм, позволяющий провести анализ процесса взаимодействия электромагнитной волны, поляризация которой представлена параметрами Стокса, со средой, через которую распространяется электромагнитная волна.

Рассмотрим распространение электромагнитной волны в однородной и турбулентной средах, а также в среде с метеорологическими образованиями.

### 2.1. Исследование влияния однородной среды на распространение электромагнитной волны при радиолокационном наблюдении навигационных объектов

При распространении электромагнитной волны в однородной среде градиент показателя преломления в направлении распространения радиолокационных сигналов удовлетворяет следующему условию:

$$\frac{dn}{dR} = 0, \quad (1)$$

где  $n$  — коэффициент преломления однородной среды;  $R$  — расстояние до навигационного объекта, км.

Коэффициент преломления однородной среды определяется следующим соотношением [7]:

$$n = 1 + \left[ \frac{78,5P}{T} \left( 1 + 7,717 \frac{q}{T} \right) \right] \cdot 10^{-6} + \frac{3W}{\rho} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|, \quad (2)$$

где  $P$  — давление атмосферы в миллибарах;  $T$  — абсолютная температура, °К;  $q$  — удельная влажность воздуха, г/кг;  $W$  — водность аэрозоля, г/м<sup>3</sup>;  $\rho$  — плотность вещества аэрозоля, г;  $m$  — комплексный коэффициент преломления электромагнитных волн в атмосфере.

При распространении радиолокационных сигналов от антенны судовой РЛС до навигационного объекта и обратно к антенне в однородной среде будет отсутствовать их рассеяние и преобразование поляризации электромагнитной волны. Представим электромагнитную волну энергетическими параметрами Стокса в виде матриц на излучение и прием, а процесс распространения электромагнитной волны в однородной среде матрицей, состоящей из 16-ти коэффициентов. Тогда в любом выбранном базисе  $[\vec{e}_1, \vec{e}_2]$  в матрицах прямого и обратного распространения оказываются равными нулю перекрестные коэффициенты, а сами матрицы будут диагональными. Для прямого распространения электромагнитной волны от

антенны судовой РЛС до навигационного объекта матрица однородной среды запишется в виде

$$\begin{bmatrix} I_n \\ Q_n \\ U_n \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ Q_a \\ U_a \\ V_a \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $I_n, Q_n, U_n, V_n$  — параметры Стокса электромагнитной волны, прошедшей через однородную среду от антенны судовой РЛС до навигационного объекта;  $n_{11} \dots n_{44}$  — коэффициенты матрицы прямого распространения электромагнитной волны;  $I_a, Q_a, U_a, V_a$  — параметры Стокса электромагнитной волны, излучаемой антенной судовой РЛС.

В общем виде параметры Стокса связаны с амплитудами  $E_x$  и  $E_y$  ортогональных компонент электромагнитной волны, параллельных осям  $X$  и  $Y$  декартовой системы координат и разностью фаз  $\Phi_{xy}$  между ними, следующей зависимостью:

$$\begin{aligned} I &= E_x^2 + E_y^2, \\ Q &= E_x^2 - E_y^2, \\ U &= 2E_x E_y \cos \Phi_{xy}, \\ V &= 2E_x E_y \sin \Phi_{xy}. \end{aligned} \quad (4)$$

Матрица обратного распространения электромагнитной волны от навигационного объекта в сторону антенны судовой РЛС для однородной среды имеет вид:

$$\begin{bmatrix} I'_n \\ Q'_n \\ U'_n \\ V'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n'_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n'_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n'_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n'_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ Q_o \\ U_o \\ V_o \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $I'_n, Q'_n, U'_n, V'_n$  — параметры Стокса электромагнитной волны, прошедшей через однородную среду от объекта до антенны судовой РЛС;  $n'_{11} \dots n'_{44}$  — коэффициенты матрицы обратного распространения электромагнитной волны;  $I_o, Q_o, U_o, V_o$  — параметры Стокса электромагнитной волны, отраженной от навигационного объекта.

При однопозиционной локации, в силу равенства соответствующих диагональных коэффициентов матриц прямого и обратного распространения, матрица распространения электромагнитной волны является диагональной и будет определяться только матрицей прямого распространения (3).

При распространении электромагнитной волны в однородной среде компоненты  $E_x$  и  $E_y$  получают одинаковые набеги фаз, поэтому для определения поляри-

зации электромагнитной волны нет необходимости в полном знании абсолютных фаз ортогональных составляющих, а достаточно лишь знания разности фаз между ними. Тогда с учетом этого матрица распространения для случая однопозиционной локации примет вид:

$$[n_{mn}]_{\Sigma} = e^{\Delta\Phi} \begin{bmatrix} n_{11}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_{22}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_{33}^2 e^{j\Phi_{xy}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{44}^2 e^{j\Phi_{xy}} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $\Phi_{xy} = \Phi_x - \Phi_y$  — разность фаз между ортогональными составляющими электромагнитной волны;  $\Delta\Phi$  — набег фазы при распространении электромагнитной волны.

Фазовые множители  $\Delta\Phi$  и  $\Phi_{xy}$  можно не учитывать, т.к. они не изменяются при распространении электромагнитной волны сквозь однородную среду. В этом случае анализ матрицы распространения для однородной среды сводится к исследованию модулей ее коэффициентов. Так как свойства однородной среды одинаковы во всех направлениях, то коэффициенты матрицы прямого и обратного распространения будут одинаковыми и равными:

$$\begin{aligned} n_{11} = n_{22} = n_{33} = n_{44} &= 10^{-0,1\alpha_0 R}, \\ n'_{11} = n'_{22} = n'_{33} = n'_{44} &= 10^{-0,1\alpha_0 R'}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\alpha_0$  — удельный коэффициент ослабления электромагнитной волны в однородной среде, дБ/км;  $R, R'$  — расстояния от передающей антенны судовой РЛС до навигационного объекта и обратно, км.

В этом случае матрица распространения сводится к скаляру, представляющему собой суммарный коэффициент ослабления на трассе распространения, т.е.

$$[n_{mn}]_{\Sigma} = 10^{-0,2\alpha_0 R}. \quad (8)$$

Для однородной среды, в которой отсутствует турбулентность и метеорологические образования, удельный коэффициент ослабления будет равен удельному коэффициенту ослабления газами атмосферы. Из газов, составляющих атмосферу, ослабление высокочастотного излучения наиболее сильно вызывают кислород и водяной пар, для которых имеются области частот, где поглощение особенно велико за счет резонансных явлений.

Для расчета удельного ослабления энергии электромагнитной волны в газах атмосферы  $\alpha_{ог}$  на различных высотах используется выражение [8]

$$\alpha_{ог}(h) = \alpha_{ок} e^{-\frac{h}{5.3}} + \alpha_{овп} \rho_0 e^{-\frac{h}{2.1}}, \quad (9)$$

где  $\alpha_{ок}$  — удельный коэффициент поглощения энергии волны в кислороде по трассе ее распространения, дБ/км;  $\alpha_{овп}$  — удельный коэффициент поглощения

энергии волны в водяном паре по трассе ее распространения, дБ/км;  $\rho_0$  — удельная влажность воздуха однородной атмосферы, г/м<sup>3</sup>;  $h$  — высота, на которой рассчитывается удельный коэффициент ослабления электромагнитной волны, км.

Таким образом, при распространении электромагнитной волны в однородной среде, матрица распространения характеризует ослабление электромагнитной энергии только газами среды.

## 2.2. Анализ влияния метеорологических образований на процесс распространения электромагнитной волны при наблюдении навигационных объектов судовой РЛС

При наличии на трассе распространения электромагнитной волны метеорологических образований в виде облачности и осадков, которые также будем считать однородными, то суммарные удельные коэффициенты ослабления энергии электромагнитной волны по трассе распространения определяются из условия

$$[n_{mn}]_{\Sigma} = 10^{-0,2[\alpha_0 R + \alpha_{0\text{ОБЛ}} W R_{\text{ОБЛ}} + \alpha_{0\text{Д}} I_{\text{Д}} R_{\text{Д}}]}, \quad (10)$$

где  $R_{\text{ОБЛ}}$  и  $R_{\text{Д}}$  — протяженность зоны облаков и дождя по трассе распространения;  $W$  — водность облаков, г/м<sup>3</sup>;  $I_{\text{Д}}$  — интенсивность осадков, мм/ч.

В общем случае метеорологические образования представляют собой совокупность водяных капель и ледяных кристаллов. При распространении электромагнитной волны сквозь такое метеорологическое образование ее сигнал будет представлять суперпозицию прямого и рассеянного вперед сигналов. Вследствие этого, матрицу распространения метеорологических образований представим состоящей из двух составляющих — детерминированной и статистической [11, 12].

Среду на пути распространения электромагнитной волны от передающей антенны судовой РЛС до навигационного объекта представим в виде матрицы прямого распространения:

$$\begin{bmatrix} I_n \\ Q_n \\ U_n \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{n11} + n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} \\ n_{21} & n_{n22} + n_{22} & n_{23} & n_{24} \\ n_{31} & n_{32} & n_{n33} + n_{33} & n_{34} \\ n_{41} & n_{42} & n_{43} & n_{n44} + n_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ Q_a \\ U_a \\ V_a \end{bmatrix} \quad (11)$$

или в виде четырех линейных уравнений:

$$\begin{aligned} I_n &= (n_{n11} + n_{11})I_a + n_{12}Q_a + n_{13}U_a + n_{14}V_a, \\ Q_n &= n_{21}I_a + (n_{n22} + n_{22})Q_a + n_{23}U_a + n_{24}V_a, \\ U_n &= n_{31}I_a + n_{32}Q_a + (n_{n33} + n_{33})U_a + n_{34}V_a, \\ V_n &= n_{41}I_a + n_{42}Q_a + n_{43}U_a + (n_{n44} + n_{44})V_a. \end{aligned} \quad (12)$$

Прямая составляющая прохождения волны от антенны судовой РЛС через среду, состоящую из частиц облаков и осадков, до навигационного объекта характеризуется коэффициентами матрицы (12)  $n_{n11}, n_{n22}, n_{n33}, n_{n44}$ , а рассеянная состав-

ляющая электромагнитной волны на метеорологическом образовании учитывается основными компонентами матрицы (11)  $n_{11}, n_{22}, n_{33}, n_{44}$  и перекрестными  $n_{12}, n_{13}, n_{14}, n_{21}, n_{23}, n_{24}, n_{31}, n_{32}, n_{34}, n_{41}, n_{42}, n_{43}$ .

Как следует из (12), диагональные коэффициенты матрицы прямого распространения метеорологических образований представляют собой сумму двух коэффициентов, один из которых является детерминированным, а второй — случайным. Все перекрестные коэффициенты матрицы являются также случайными. Тогда матрица прямого распространения  $[n_{mn}]$  может быть представлена в виде совокупности двух матриц, одна из которых характеризует прямое прохождение электромагнитной волны через среду до навигационного объекта  $[n_{\Pi mn}]$ , а вторая — прохождение за счет рассеяния  $[n_{Pmn}]$ :

$$[n_{mn}] = [n_{\Pi mn}] + [n_{Pmn}]. \quad (13)$$

Матрица распространения (11), характеризующая прямое распространение электромагнитной волны, рассмотрена выше. Что касается матрицы распространения, обусловленной рассеянием, то ее коэффициенты претерпевают случайные изменения, следуя за случайными изменениями элементарных сигналов рассеянных частицами облаков и осадков. Поэтому матрица распространения, обусловленная рассеянием, будет статистической матрицей [1].

Матрицу (13), характеризующую прямое распространение электромагнитной волны, назовем детерминированной матрицей прямого распространения, а матрицу, характеризующую рассеянную часть, назовем статистической матрицей прямого распространения.

Для однородных метеорологических образований детерминированная матрица прямого распространения может быть заменена скалярным множителем ослабления в соответствии с выражением

$$[n_{\Pi mn}] = \begin{bmatrix} n_{m11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & n_{m22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & n_{m33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_{m44} \end{bmatrix} = 10^{-0,1\alpha_0 R}, \quad (14)$$

где  $\alpha_0$  — удельный коэффициент ослабления, дБ/км;  $R$  — протяженность метеорологического образования, км.

Так как помимо ослабления электромагнитной волны в выпадающих осадках имеет место ослабление в газах атмосферы, а также ослабление в облаках, то матрица (14) может быть представлена в виде:

$$[n_{\Pi mn}] = 10^{-0,1[\alpha_{0Г}R + \alpha_{0ОБЛ}WR_{ОБЛ} + \alpha_{0Д}I_{Д}R_{Д}]}, \quad (15)$$

где  $\alpha_{0Г}$  — удельный коэффициент ослабления в газах атмосферы, дБ/км;  $\alpha_{0ОБЛ}$  — удельный коэффициент ослабления в облаках, дБ/км;  $\alpha_{0Д}$  — удельный коэффициент ослабления в дожде, дБ/км;  $R$  — расстояние от антенны судовой РЛС до

навигационного объекта, км;  $R_{\text{обл}}, R_{\text{д}}$  — протяженность облаков и зоны выпадающего дождя на трассе распространения электромагнитной волны, км;  $W$  — водность облаков, г/м<sup>3</sup>;  $I_{\text{д}}$  — интенсивность выпадающих осадков, мм/ч.

Статистическая матрица прямого распространения будет иметь коэффициенты, случайно изменяющиеся во времени, и может быть представлена в виде:

$$[n_{\text{Пmn}}] = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & n_{24} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & n_{34} \\ n_{41} & n_{42} & n_{43} & n_{44} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Корреляция между элементами статистической матрицы распространения может существовать в том случае, если возникает взаимосвязь пространственного расположения частиц в облаках и осадках, а средние значения элементов статистической матрицы распространения отличны от нуля.

Для метеорологических образований, у которых пространственное расположение одних частиц не зависит от пространственного расположения других, элементы статистической матрицы распространения, расположенные на ее главной диагонали, оказываются некоррелированными друг с другом. Перекрестные элементы, наоборот, имеют жесткую корреляционную связь и равные дисперсии, так как являются суммой одинакового числа слагаемых, которые равны между собой при одинаковых индексах. Общие статистические свойства статистической матрицы распространения описываются нормальным законом распределения с нулевыми средними и дисперсиями элементов матрицы, расположенными на главной диагонали  $\sigma_{11}^2, \sigma_{22}^2, \sigma_{33}^2, \sigma_{44}^2$  и дисперсиями  $\sigma_{mn}^2 = \sigma_{nm}^2$ .

По аналогии с матрицей прямого распространения метеорологических образований может быть введена матрица обратного распространения, которая состоит из детерминированной и статистической матриц, элементами которых являются коэффициенты, связывающие между собой составляющие электромагнитной волны у приемной антенны судовой РЛС с соответствующими составляющими у навигационного объекта.

Таким образом, при распространении электромагнитных волн в среде с метеорологическими образованиями, для учета влияния данной среды на процессы распространения электромагнитной волны, необходимо проводить анализ матриц прямого и обратного распространения.

### 2.3. Распространение электромагнитной волны в турбулентной атмосфере при наблюдении навигационных объектов судовой РЛС

Среда, в которой распространяются электромагнитные волны, излучаемые антенной судовой РЛС, при наблюдении навигационных объектов, также является средой с развитой турбулентностью, интенсивность которой зависит от метеорологических условий на пути судна. В настоящее время установлено, что процесс турбулентности с некоторым приближением можно считать стационарным [9]. При этом коэффициент преломления турбулентной среды распространения электромагнитной волны можно представить в виде двух слагаемых

$$n(x, y, z, t) = \bar{n}(x, y, z, t) + \Delta n(x, y, z, t), \quad (17)$$

где  $\bar{n}(x, y, z, t)$  — среднее значение коэффициента преломления турбулентной среды;  $\Delta n(x, y, z, t)$  — отклонение коэффициента преломления турбулентной среды от его среднего значения.

С учетом связи между коэффициентом преломления и коэффициентом диэлектрической проницаемости среды, последний также будет изменяться случайным образом. В силу этого коэффициент диэлектрической проницаемости также можно представить в виде суммы двух составляющих

$$\varepsilon(x, y, z, t) = \bar{\varepsilon}(x, y, z, t) + \Delta\varepsilon(x, y, z, t), \quad (18)$$

где  $\bar{\varepsilon}(x, y, z, t)$  — среднее значение коэффициента диэлектрической проницаемости турбулентной среды;  $\Delta\varepsilon(x, y, z, t)$  — отклонение коэффициента диэлектрической проницаемости турбулентной среды от его среднего значения.

Флюктуационная часть коэффициента диэлектрической проницаемости турбулентной среды удовлетворяет следующему условию:

$$\Delta\varepsilon(x, y, z, t) \approx 10^{-6} \div 10^{-5}, \quad (19)$$

а его среднее значение приблизительно равно единице [9], т.е.

$$\bar{\varepsilon}(x, y, z, t) \approx 1. \quad (20)$$

Турбулентную среду можно представить в виде плоского слоя, на который вдоль оси  $Y$  падает однородная плоская монохроматическая электромагнитная волна, электрическая  $E_z$  и магнитная  $H_y$  составляющие которой записываются в виде

$$\begin{aligned} E_z &= E_{z_0} \cos(\omega t - K_y); \\ H_x &= H_{x_0} \frac{1}{z_0} \cos(\omega t - K_y), \end{aligned} \quad (21)$$

где  $K_y$  — волновое число;  $z_0$  — волновое сопротивление среды.

В некоторой точке среды составляющие электромагнитной волны  $E_z$  и  $H_y$  будут связаны между собой с помощью четырех уравнений Максвелла [10]:

$$\begin{aligned} \nabla E &= -j\omega\mu_0 H, \\ \nabla H &= -j\omega\varepsilon_0\varepsilon'(x, y, z) E, \\ \nabla[\varepsilon_0\varepsilon'(x, y, z) E] &= 0, \\ \nabla\mu_0 H &= 0, \end{aligned} \quad (22)$$



где  $\nabla$  — дифференциальный оператор;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;  $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$  — диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м;  $\varepsilon' = \frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_0} + \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0}$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды.

В (22) из третьего уравнения Максвелла следует:

$$\nabla E = -\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon'(x, y, z)} \cdot E \nabla \varepsilon_0 \varepsilon'(x, y, z), \quad (23)$$

а из второго уравнения Максвелла следует:

$$\nabla \cdot \nabla \cdot H = \nabla(\nabla \cdot H) - \nabla H = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon'(x, y, z) \nabla \cdot j\omega [E \nabla \varepsilon_0 \varepsilon'(x, y, z)]. \quad (24)$$

Тогда, с учетом первого уравнения Максвелла в (22), выражение (24) записывается в виде:

$$\nabla \cdot \nabla \cdot \nabla H = \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon'(x, y, z) H + j\omega [E \nabla \varepsilon_0 \varepsilon'(x, y, z)]. \quad (25)$$

Из (25) получается следующая зависимость:

$$\nabla^2 H + \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon'(x, y, z) H = \frac{1}{\varepsilon'(x, y, z)} \nabla H \nabla \varepsilon'(x, y, z). \quad (26)$$

А из (26) записывается следующее уравнение:

$$\nabla(\nabla E) = \nabla^2 E + \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon'(x, y, z) \mu_0 E. \quad (27)$$

Исходя из (25), получим:

$$\nabla^2 E + \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon'(x, y, z) \mu_0 E = -\nabla \left[ \frac{E \varepsilon_0}{\varepsilon_0 \varepsilon'(x, y, z)} \cdot \varepsilon'(x, y, z) \right]. \quad (28)$$

В результате такого представления уравнений Максвелла получают исходные уравнения, интегрирование которых и позволяет определить изменение поляризации электромагнитной волны при ее распространении через турбулентную среду, а также и коэффициенты матрицы распространения  $[S]$ :

$$[S] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} + \Delta\varepsilon_{11} & \Delta\varepsilon_{12} & \Delta\varepsilon_{13} & \Delta\varepsilon_{14} \\ \Delta\varepsilon_{21} & \Delta\varepsilon_{22} + \Delta\varepsilon_{22} & \Delta\varepsilon_{23} & \Delta\varepsilon_{24} \\ \Delta\varepsilon_{31} & \Delta\varepsilon_{32} & \Delta\varepsilon_{33} + \Delta\varepsilon_{33} & \Delta\varepsilon_{34} \\ \Delta\varepsilon_{41} & \Delta\varepsilon_{42} & \Delta\varepsilon_{43} & \Delta\varepsilon_{44} + \Delta\varepsilon_{44} \end{bmatrix}. \quad (29)$$

В принципе достаточно использовать уравнение (27) или (28), из которых определяется электрическая или магнитная компонента электромагнитной волны, причем вторая составляющая компоненты волны может быть определена по первой. В результате представления полученных соотношений в виде составляющих вдоль выбранных координатных осей и проведения интегрирования продольная

составляющая электромагнитной волны, распространяющаяся в турбулентной среде запишется в виде

$$\Delta E_y = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \Gamma \left[ E_x \frac{1}{1 + \varepsilon'(x, y, z)} \cdot \frac{\partial \varepsilon'(x, y, z)}{\partial \xi} \right] d\xi' d\xi d\eta, \quad (30)$$

где  $\Gamma$  — преобразование Гильберта, связывающее составляющие электромагнитной волны [5, 6].

Перекрестно поляризованная составляющая электромагнитной волны, определяющая изменение ее поляризации при прохождении сквозь турбулентную среду, запишется следующим образом:

$$\Delta E_x = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \Gamma \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{E_z}{1 + \varepsilon'(x, y, z)} \cdot \frac{\partial \varepsilon'(x, y, z)}{\partial \xi} + \frac{\Delta E_y}{1 + \varepsilon'(x, y, z)} \cdot \frac{\partial \varepsilon'(x, y, z)}{\partial \eta} \right] d\xi' d\xi d\eta. \quad (31)$$

Использование (30) и (31) позволяет получить выражение для составляющей рассеянной волны, параллельной вектору поля падающей в виде:

$$\Delta E_z = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \Gamma \left\{ \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon'(x, y, z) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left[ \frac{E_z}{1 + \varepsilon'(x, y, z)} \cdot \frac{\partial \varepsilon'(x, y, z)}{\partial \xi} \right] \right\} d\xi' d\xi d\eta. \quad (32)$$

Анализ (31) и (32) показывает, что первые части этих соотношений состоят из двух слагаемых, одно из которых определяет электромагнитное поле, обусловленное не турбулентной средой, а второе турбулентной. Изменение поляризации волны при прохождении сквозь турбулентную среду при радиолокационном наблюдении навигационных объектов будет иметь место тогда, когда вектор электрического поля, падающей на турбулентную среду волны, не ортогонален вектору градиента коэффициента диэлектрической проницаемости среды. Нормированная величина перекрестно поляризованной составляющей электромагнитной волны при ее распространении через турбулентную среду, определяет модули перекрестных элементов матрицы распространения. Величину диагональных коэффициентов матрицы распространения электромагнитной волны будут определять нормированные величины соответствующих составляющих суммы падающей и рассеянной компонент электромагнитной волны.

## Выводы

Проведено исследование влияния трех различных сред (однородной, с метеорологическими образованиями и турбулентной) на процессы распространения через них электромагнитных волн при помощи компактного формализма матриц Мюллера прямого и обратного распространения.

1. Канарейкин Д.Б., Потехин В.А., Шишкин Н.С. Морская поляриметрия. Ленинград: Судостроение, 1968. 328 с.
2. Князь А.И. Совершенствование методов и средств дистанционного наблюдения навигационных объектов на пути судна: дис. ... канд. техн. наук. Одесса, 2015. 196 с.

3. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. Москва: Советское радио, 1966. 440 с.
4. Корбан Д.В. Влияние атмосферы на измерение дальности навигационных объектов судовой РЛС. *Судовые энергетические установки: научно-технический сборник*. Вып. 35. Одесса: ОНМА, 2015. С.128–136
5. Авишев В.Б., Сарычев В.А., Козлов А.И. Радиолокационные характеристики целей и информационные (радиолокационные) каналы [в кн.: Поляризация сигналов в сложных радиоэлектронных комплексах]. Санкт-Петербург: Хронограф, 1994. С. 280–311.
6. Авишев В.Б., Бернер В.М., Грошев С.А., Козлов А.И., Сарычев В.А. Методы, используемые в узкополосной радиополяриметрии [в кн.: Поляризация сигналов в сложных радиоэлектронных комплексах]. Санкт-Петербург: Хронограф, 1994. С. 342–417.
7. Билетов М.В., Кузьменко В.П., Павлов Н.Ф., Цивенко Н.В. Радиометеорология. Москва: Военное издательство, 1984. 208 с.
8. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1966. 350 с.
9. Татарский В.И. Распространение радиоволн в турбулентной атмосфере. Москва: Наука, 1967. 548 с.
10. Гольдфайн И.А. Векторный анализ и теория поля. Москва: Наука, 1968. 129 с.
11. Пуятин В.Г., Гуденко С.Ю., Заичко С.И., Корбан Д.В., Князь А.И. Радиолокационное распознавание навигационных объектов на пути судна по поляризационным параметрам электромагнитной волны. *Математические машины и системы*. 2017. № 4. С. 120–128.
12. Пуятин В.Г., Корбан Д.В., Князь А.И. Влияние осадков на разрешающую способность судовой радиолокационной станции по угловым координатам. *Реєстрація, зберігання і оброб. даних*. 2017. Т. 19. № 4. С. 26–34.

Поступила в редакцию 13.03.2018