

УДК 621.396.932

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ РАСПОЗНАВАНИИ ОБЪЕКТОВ

Корбан В.Х., Корбан Д.В., Дегтярева Л.Н.

*Одесская национальная академия связи им. А.С.Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
l.demenko@mail.ru*

ВИКОРИСТАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ ПРИ РАДИОЛОКАЦІЙНОМУ РОЗПІЗНАВАННІ ОБ'ЄКТІВ

Корбан В.Х., Корбан Д.В., Дегтярьова Л.М.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
l.demenko@mail.ru*

USE POLARIZATION OF AN ELECTROMAGNETIC WAVE AT A RADAR OBJECT RECOGNITION

Korban V.Kh., Korban D.V., Degtjarjeva L.N.

*O.S.Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
l.demenko@mail.ru*

Аннотация. В статье обоснован радиолокационный метод распознавания различных объектов путем количественной оценки поляризационных свойств случайного электромагнитного поля на основе факторизации параметров Стокса и коэффициентов матрицы рассеяния наблюдаемого объекта. Задача радиолокационного обнаружения, распознавание и наблюдение объектов рассматривается с учетом их поляризационных свойств и поляризационных параметров электромагнитной волны на излучение и прием. Поляризационные параметры обеспечивают выявление структуры и свойств объектов, находящихся в зоне функционирования радиолокационной системы с требуемой для пользователя полнотой. По измерению модулей элементов поляризационной матрицы рассеяния в линейном базисе определяется структура объекта. Распознавание на основе имеющегося тезауруса производится путем сравнения эхо-сигналов объекта с сигналами от известных в банке данных объектов. Распознавание осуществляется с использованием арсенала математических структур с неопределенностью, характеризуемой статистически, вероятно или с помощью нечетных множеств. Однако при формировании тезауруса записываемые радиолокационные эхо-сигналы существенно зависят от условий радиолокационного наблюдения за объектом. Эти сигналы могут быть восстановлены полностью для любых условий наблюдения, если известны матрицы рассеяния объекта. Процесс радиолокационного распознавания объекта усложняется при наличии метеообразований, которые экранируют объект, а эхо-сигналы поступают на вход приемника РЛС в виде суммы эхо-сигнала объекта и эхо-сигнала метеообразования. Используемые методы распознавания объекта, находящегося в зоне выпадающих осадков, малоэффективны. Задача распознавания может быть решена с применением поляризационного анализа эхо-сигналов, позволяющего выделить в приемнике эхо-сигнал объекта и эхо-сигнал метеорологического фона.

Ключевые слова: радиолокационное распознавание объектов, поляризационные параметры Стокса, матрица рассеяния, полностью поляризованные волны, частично поляризованные волны, коэффициенты матрицы, эхо-сигналы, неполяризованная волна, степень поляризации.

Анотація. У статті обґрунтований радіолокаційний метод розпізнавання різних об'єктів шляхом кількісної оцінки поляризаційних властивостей випадкового електромагнітного поля на основі факторизації параметрів Стокса і коефіцієнтів матриці розсіювання спостережуваного об'єкта. Задача радіолокаційного виявлення, розпізнавання та спостереження об'єктів розглядається з урахуванням їх поляризаційних властивостей та поляризаційних параметрів електромагнітної хвилі на випромінювання та прийом. Поляризаційні параметри забезпечують виявлення структури і властивостей об'єктів, які знаходяться в зоні функціонування радіолокаційної системи з необхідною для користувача повнотою. За вимірами модулів елементів поляризаційної матриці розсіювання в лінійному базисі визначається структура об'єкта. Розпізнавання на основі даного тезауруса відбувається шляхом порівняння ехо-сигналів об'єкта з сигналами від відомих у банку даних об'єктів. Розпізнавання здійснюється з використанням арсеналу математичних структур з невизначеністю, яка характеризується статистично, ймовірно або за допомогою непарних множин. Проте при формуванні тезауруса записувані радіолокаційні ехо-сигнали суттєво залежать від умов радіолокаційного спостереження за об'єктом. Ці сигнали можуть бути відновлені повністю для будь-яких умов спостереження, якщо відомі матриці розсіювання об'єкта. Процес радіолокаційного розпізнавання об'єкта ускладнюється наявністю метеоутворень, які екранують об'єкт, а ехо-сигнали надходять на вхід приймача РЛС у вигляді суми ехо-сигналу об'єкта й ехо-сигналу метеоутворення. Використовувані методи розпізнавання об'єкта, який знаходиться у зоні опадів, що випадають, малоефективні. Задача розпізнавання може бути розв'язана із застосуванням поляризаційного аналізу ехо-сигналів, який дозволяє виділити у приймачі ехо-сигнал об'єкта та ехо-сигнал метеорологічного фону.

Ключові слова: радіолокаційне розпізнавання об'єктів, поляризаційні параметри Стокса, матриця розсіювання, повністю поляризовані хвилі, частково поляризовані хвилі, коефіцієнти матриці, ехо-сигнали, неполяризована хвиля, ступінь поляризації.

Abstract. In the article the radio-location method of recognition of different objects is reasonable by the quantitative estimation of polarization properties of the casual electromagnetic field on the basis of factorization of parameters of Stokes and coefficients of matrix of dispersion of the looked after object. The task of radio-location discovery, recognition and supervision of objects, is examined taking into account their polarization properties and polarization parameters of electromagnetic wave on a radiation and reception. Polarization parameters provide the identification of the structure and properties of objects in the zone of operation of the radar system with the required user completeness. By measuring the polarization module elements of the scattering matrix on a linear basis is determined by the structure of the object. Thesaurus based on the available detection is performed by comparing the echo signals from the object to the bank of known objects. Detection is performed using an arsenal of mathematical structures with uncertainty, characterized by statistical, probabilistic or using odd sets. However, when forming the thesaurus recorded radar echoes depend essentially on the conditions of the radar observation of the object. These signals can be fully restored for all viewing conditions, if we know the scattering matrix object. The process is complicated by the radar detection object in the presence of meteorological formations that screen object and the echo signals are input to the radar receiver as a sum of echo and meteorological formations object echo. Used object recognition techniques, located in the zone of precipitation falling ineffective. The recognition problem can be solved by using polarization analysis of the echo signals at the receiver which allows to allocate an echo of the object and the echo signal meteorological background.

Key words: radar detection of objects polarization Stokes parameters, the scattering matrix is completely polarized wave, partially polarized waves, the matrix coefficients of the echo signals, non-polarized wave, the degree of polarization.

До настоящего времени задачи радиолокационного распознавания и селекции объектов полностью не решены. Рассматриваются возможности использования методов голографии, несинусоидальных волн (волн Уолша), импульсов нано- и пикосекундной длительности, накопленного тезауруса и др. Распознавание на основе имеющегося тезауруса производится путем сравнения эхо-сигналов с имеющимися в банке данных эхо-сигналов от известных объектов. Облака и осадки, имеют различные физические свойства, и состоят из частиц различного размера, формы, ориентации в пространстве и различного фазового состояния (лед, вода). Эхо-сигнал от такого сложного объекта является частично-поляризованным. Если точечный объект находится в зоне выпадающих осадков, то его распознавание с помощью радиолокационных средств существующими методами

представляет сложную задачу, особенно при большой интенсивности осадков. Такой эхо-сигнал будет состоять из эхо-сигнала от точечного объекта и эхо-сигнала осадков. Однако сложность использования накопленного тезауруса состоит в том, что записываемые в банк эхо-сигналы объектов существенно зависят от условий радиолокационного наблюдения за объектом, поляризации передающей и приемной антенн, ракурса наблюдения, дальности объекта, его скорости, матрицы рассеяния. Эти методы не учитывают поляризационные свойства электромагнитной волны при зондировании объекта, а пренебрежение при анализе параметров эхо-сигналов их поляризационным состоянием приводит к потере радиолокационной информации об объекте [1]. Поэтому возникает необходимость при радиолокационном распознавании объектов использовать поляризацию электромагнитной волны как важнейший потенциальный источник информации об объекте, что является **целью статьи**.

Будем рассматривать рассеянное поле метеообъектом как носитель информации о рассеивателе, что позволяет считать рассеянное поле пространственно-временным эхо-сигналом. Семантика системы эхо-сигналов будет соответствовать определенной априорной информации о соотношении источников сигналов с параметрами (поляризационными) анализируемого сигнала, и выступать как часть тезауруса МРЛ, обслуживающего процесс радиолокационного наблюдения. При проведении радиолокационного наблюдения за метеообъектом производится разделение известной информации и неизвестной. Неизвестную радиолокационную информацию необходимо параметризовать некоторыми характеристиками, связанными со структурой объекта, а основной поток радиолокационной информации, сформулированный метеообъектом, является сквозным от входа (антенна) к выходу (индикаторы) МРЛС. Синтаксический подход к исследованию физических процессов получения радиолокационной информации о метеообъекте предусматривает структурный анализ поступающей от объекта пространственно-временной и поляризационной информации без учета ее содержания и полезности. Использование семантического подхода позволяет сделать анализ смыслового содержания полученной с помощью МРЛС радиолокационной информации, а прагматический подход оценивает полезность и ценность данной радиолокационной информации об объекте для потребителя.

Рассеяние электромагнитных волн представим с помощью оператора рассеяния (матрицы) Мюллера, не зависящего от расстояния до метеообъекта, характеризующего только рассеивающую способность объекта и связывающего параметры облучающей и отраженной электромагнитных волн. Для исследуемого метеообъекта зависимость от времени элементов матрицы $S(t)$ жесткая, соответствующая постоянному матричному импульсному отклику. В [2] процесс рассеяния плоских электромагнитных волн представлен в виде трех матриц с введением электрической и магнитной составляющих электромагнитной волны:

$$\begin{bmatrix} E_1^{np}(t) \\ E_2^{np}(t) \\ H_1^{np}(t) \\ H_2^{np}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & S_{13}(t) & S_{14}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & S_{23}(t) & S_{24}(t) \\ S_{31}(t) & S_{32}(t) & S_{33}(t) & S_{34}(t) \\ S_{41}(t) & S_{42}(t) & S_{43}(t) & S_{44}(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_1^{изл}(t) \\ E_2^{изл}(t) \\ H_1^{изл}(t) \\ H_2^{изл}(t) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

В радиолокационных измерениях используется только электрическая составляющая электромагнитной волны, что связано с тем, что направление облучения метеообъекта и направление приема эхо-сигнала жестко определены условиями радиолокационного наблюдения, т.е. задача рассеяния становится одноканальной. Использование магнитной составляющей позволяет осуществлять прием эхо-сигнала метеообъекта с любого направления зондирования.

Матрица $S(t)$ является полной характеристикой рассеивающих свойств объекта, поскольку она позволяет определить поляризационную структуру эхо-сигнала при любой

поляризации облучающей волны и любых фиксированных условиях радиолокационного наблюдения объекта.

Синтез процедуры измерения характеристик рассеяния радиолокационного сигнала от объекта радиолокационного наблюдения, необходимая информация которого заключена в коэффициентах матрицы рассеяния при любых входных и выходных поляризаационных базисах и при соблюдении инвариантности от условий измерения, предполагает отдельный поляризаационный прием по ортогональным приемным волноводным каналам двух ортогональных составляющих: отраженной от объекта электромагнитной волны и поляризаационное разнесение при излучении.

Важнейшей задачей радиолокационного наблюдения объектов является их распознавание по параметрам отраженного сигнала, зависящего от формы объекта, его размеров, электрических свойств, а также от длины облучающей объект волны и ее поляризации. С точки зрения формирования эхо-сигнала, объекты радиолокационного наблюдения делятся на малоразмерные и распределенные в пространстве (метеобъекты) или на поверхности. Если размеры наблюдаемых объектов меньше размеров элемента разрешения РЛС по дальности и угловым координатам, то такие объекты относятся к малоразмерным (линейный вибратор, металлическая пластина, металлический и диэлектрический шары, уголки отражатели), имеющих простейшую геометрическую конфигурацию и их отражающие свойства легко определяются теоретически и измеряются экспериментально. Однако в реальных условиях радиолокационного наблюдения объекты представляют собой сложные конструкции (самолет, корабль и др.).

Кроме малоразмерных и конструктивно сложных объектов при радиолокационном наблюдении встречаются объемно-распределенные (облака, осадки, вулканическая пыль, пыльные бури и др.) и поверхностно-распределенные (морская поверхность, поверхность суши и др.) объекты, размеры которых значительно превышают элемент разрешения РЛС. Отражение радиолокационного сигнала от объемно-распределенных и поверхностно-распределенных объектов происходит в результате интерференции сигналов отражателей, которые распределены в пределах элемента разрешения РЛС.

Формирование эхо-сигнала объекта зависит также и от вида поляризации облучающей волны, которую можно представить с помощью четырех действительных параметров, каждый из которых имеет размерность интенсивности. Эти параметры называются параметрами Стокса и обозначаются через S_0, S_1, S_2, S_3 , и определяются через декартовы компоненты поперечного электрического поля [3], т.е.

$$S_0 = \langle E_x^2(t) \rangle + \langle E_y^2(t) \rangle = \langle P_x(t) \rangle + \langle P_y(t) \rangle,$$

$$S_1 = \langle E_x^2(t) \rangle - \langle E_y^2(t) \rangle = \langle P_x(t) \rangle - \langle P_y(t) \rangle,$$

$$S_2 = 2 \langle E_x(t) E_y(t) \cos [\varphi_y(y) - \varphi_x(x)] \rangle = 2 \langle \sqrt{P_x(t) P_y(t)} \cos [\Phi_y(t) - \Phi_x(t)] \rangle,$$

$$S_3 = 2 \langle E_x(t) E_y(t) \sin [\varphi_y(y) - \varphi_x(x)] \rangle = 2 \langle \sqrt{P_x(t) P_y(t)} \sin [\Phi_y(t) - \Phi_x(t)] \rangle. \quad (2)$$

В (2) символ

$$\langle v \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v dt, \quad (3)$$

где T – достаточно большой интервал времени, на протяжении которого интеграл по времени не зависит от выбора T .

Параметры Стокса квазимонохроматической волны можно представить вектором-столбцом, называемым вектором Стокса [3]:

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

или в виде

$$S = \{ S_0, S_1, S_2, S_3 \}. \quad (5)$$

Представление электромагнитной волны вектором Стокса позволяет использовать матричный формализм при исследовании процесса взаимодействия волны с объектом.

Для неполяризованной электромагнитной волны, которая не обладает какой-либо преимущественной поляризацией, $S_1 = S_2 = S_3 = 0$ и вектор Стокса запишется в виде:

$$S = \{ S_0, 0, 0, 0 \}, \quad (6)$$

где S_0 – полная интенсивность волны.

Кроме неполяризованной волны имеется полностью поляризованная волна, обладающая только одним видом поляризации – линейной, круговой и эллиптической. Для полностью поляризованной волны параметры Стокса запишутся в виде:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2. \quad (7)$$

Частично поляризованная волна через параметры Стокса записывается следующим образом:

$$S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (8)$$

которую в общем случае можно представить в виде суммарного вектора Стокса:

$$S = S_{\text{непол}} + S_{\text{пол}}, \quad (9)$$

где

$$S_{\text{неп}} = \left\{ \left[S_0 - (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2} \right], 0, 0, 0 \right\}, \quad (10)$$

$$S_{\text{пол}} = \left\{ (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}, S_1, S_2, S_3 \right\}. \quad (11)$$

Задача радиолокационного распознавания объектов состоит в том, чтобы по данным о поляризации облучающей волны и эхо-сигнала отнести наблюдаемый объект к определенному классу. Эхо-сигналы сложного сосредоточенного объекта (самолет, корабль) при его облучении электромагнитной волной круговой поляризации, отражающие поверхности образуют двугранный уголкообразный отражатель и за счет двукратного отражения принимаются антенной МРЛС, как полностью поляризованный, поскольку эхо-сигнал круговой поляризации согласован с антенной и полностью поляризован.

Применительно к облакам и осадкам эхо-сигналы будут частично поляризованы при любой поляризации облучающей волны, что связано с несферичностью частиц облаков и осадков, их хаотической ориентацией в пространстве, различием в размерах, форме, фазовым состоянием и гравитационной скоростью падения. Полное решение электродинамической задачи рассеяния электромагнитной энергии на таких частицах до настоящего времени представляется весьма проблематичным. Для радиолокационного распознавания метеорообъектов, состоящих из указанных частиц, будем использовать параметры Стокса, которыми представим частично поляризованную, полностью поляризованную и неполяризованную волну, а отражающие свойства метеорообъекта представим матрицей рассеяния, состоящей из 16-ти коэффициентов. При этом будем исходить из теоремы Пуанкере-Хонфа, которая утверждает, что нельзя пренебрегать при анализе электромагнитного поля поляризационными явлениями, поскольку нельзя обеспечить неизменности поляризационного состояния для всех направлений дифракции и рассеяния, а

исчисление Р.Кларка Джонса можно применять для описания преобразований над частично поляризованными волнами [2].

Поляризация эхо-сигнала от объекта радиолокационного наблюдения зависит как от параметров облучающей волны (прежде всего от поляризации), так и от физических свойств рассеивателя. Зависимость поляризации отраженной от объекта электромагнитной волны от поляризации облучающей волны выражается с помощью шестнадцати коэффициентов S_{nm} , которые рассматриваются как «коэффициенты отражения» от объекта для соответствующих сочетаний поляризаций облучающей и отраженной волны.

Представим поляризационные характеристики излучаемой антенной МРЛС электромагнитной волны, волны отраженной от объекта действительными параметрами Стокса в виде матриц, а отражающие свойства объекта также в виде матрицы рассеяния, состоящей из 16-ти коэффициентов:

$$\begin{bmatrix} S_0^{\text{изл}}(t) \\ S_1^{\text{изл}}(t) \\ S_2^{\text{изл}}(t) \\ S_3^{\text{изл}}(t) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} S_0^{\text{отр}}(t) \\ S_1^{\text{отр}}(t) \\ S_2^{\text{отр}}(t) \\ S_3^{\text{отр}}(t) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & S_{13}(t) & S_{14}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & S_{23}(t) & S_{24}(t) \\ S_{31}(t) & S_{32}(t) & S_{33}(t) & S_{34}(t) \\ S_{41}(t) & S_{42}(t) & S_{43}(t) & S_{44}(t) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Взаимосвязь между тремя матрицами запишется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} S_0^{\text{отр}}(t) \\ S_1^{\text{отр}}(t) \\ S_2^{\text{отр}}(t) \\ S_3^{\text{отр}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & S_{13}(t) & S_{14}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & S_{23}(t) & S_{24}(t) \\ S_{31}(t) & S_{32}(t) & S_{33}(t) & S_{34}(t) \\ S_{41}(t) & S_{42}(t) & S_{43}(t) & S_{44}(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_0^{\text{изл}}(t) \\ S_1^{\text{изл}}(t) \\ S_2^{\text{изл}}(t) \\ S_3^{\text{изл}}(t) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

С учетом физического смысла параметров Стокса отраженной и облучающей волны, соотношение (13) запишем в виде четырех линейных уравнений:

$$\begin{aligned} S_0^{\text{отр}}(t) &= S_{11}(t)S_0^{\text{изл}}(t) + S_{12}(t)S_1^{\text{изл}}(t) + S_{13}(t)S_2^{\text{изл}}(t) + S_{14}(t)S_3^{\text{изл}}(t) = \\ &= S_{11}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{12}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{13}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \\ &+ S_{14}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t); \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} S_1^{\text{отр}}(t) &= S_{21}(t)S_0^{\text{изл}}(t) + S_{22}(t)S_1^{\text{изл}}(t) + S_{23}(t)S_2^{\text{изл}}(t) + S_{24}(t)S_3^{\text{изл}}(t) = \\ &= S_{21}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{22}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{23}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \\ &+ S_{24}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} S_2^{\text{отр}}(t) &= S_{31}(t)S_0^{\text{изл}}(t) + S_{32}(t)S_1^{\text{изл}}(t) + S_{33}(t)S_2^{\text{изл}}(t) + S_{34}(t)S_3^{\text{изл}}(t) = \\ &= S_{31}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{32}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{33}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \\ &+ S_{34}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 S_3^{\text{отр}}(t) &= S_{41}(t)S_0^{\text{изл}}(t) + S_{42}(t)S_1^{\text{изл}}(t) + S_{43}(t)S_2^{\text{изл}}(t) + S_{44}(t)S_3^{\text{изл}}(t) = \\
 &= S_{41}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{42}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{43}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \\
 &+ S_{44}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t).
 \end{aligned} \tag{17}$$

В общем случае отраженную от сосредоточенного объекта, находящегося в зоне выпадающих осадков (объемно распределенный объект), частично поляризованную электромагнитную волну можно разложить на две компоненты: полностью поляризованную и неполяризованную. Полностью поляризованная компонента, отраженная от сосредоточенного объекта электромагнитной волны, запишется через параметры Стокса следующим образом:

$$\begin{aligned}
 S_0^{\text{пол отр}}(t) &= [S_{1\text{отр}}^2(t) + S_{2\text{отр}}^2(t) + S_{3\text{отр}}^2(t)]^{1/2} = \{ [S_{21}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{22}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + \\
 &+ S_{23}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + S_{24}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t) \}^2 + \\
 &+ [S_{31}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{32}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{33}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \\
 &+ S_{34}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t) \}^2 + [S_{41}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{42}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + \\
 &+ S_{43}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + S_{44}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t) \}^2 \}^{1/2}.
 \end{aligned} \tag{18}$$

Полностью неполяризованная компонента эхо-сигнала объемно-распределенного объекта запишется через параметры Стокса в виде:

$$\begin{aligned}
 S_0^{\text{непол отр}}(t) &= S_{0\text{отр}}(t) - [S_{1\text{отр}}^2(t) + S_{2\text{отр}}^2(t) + S_{3\text{отр}}^2(t)]^{1/2} = S_{11}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + \\
 &+ S_{12}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{13}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + S_{14}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t) - \\
 &- \{ [S_{21}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{22}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{23}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \\
 &+ S_{24}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t) \}^2 + [S_{31}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{32}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + \\
 &+ S_{33}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + S_{34}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t) \}^2 + \\
 &+ [S_{41}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{42}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{43}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \\
 &+ S_{44}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t) \}^2 \}^{1/2}.
 \end{aligned} \tag{19}$$

Матрица параметров Стокса, облучающая объект электромагнитной волны для каждого вида ее поляризации, будет иметь свой вид в зависимости от составляющих $P_x(t)$, $P_y(t)$, $\Phi_{xy}(t)$.

Если в поле зрения МРЛС находится сосредоточенный объект (самолет, корабль) и объемно-распределенный, то при облучении такого объекта электромагнитной волной определенной поляризации отраженная электромагнитная волна будет частично поляризована и в ней присутствуют две компоненты – полностью поляризованная и

неполяризованная. Это отличие в поляризации отраженной волны и положено в основу радиолокационного распознавания объектов различного типа.

Практическая реализация процесса радиолокационного распознавания не вызывает особых трудностей. Поляризационное состояние отраженной от объекта электромагнитной волны можно оценить с помощью степени поляризации, которая для неполяризованной волны принимает значение, равное нулю, для полностью поляризованной волны – равное единице и для частично поляризованной волны принимает промежуточное значение между единицей и нулем, т.е.

$$m = \frac{(S_{1\text{отр}}^2 + S_{2\text{отр}}^2 + S_{3\text{отр}}^2)^{1/2}}{S_{0\text{отр}}^2} = \frac{\left\{ [S_{21}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{22}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + \right.}{\left[S_{11}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + \right.}$$

$$\left. + S_{23}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + S_{24}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t) \right\}^{1/2} + [S_{31}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] +$$

$$\left. + S_{12}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + \right.}{\left. + S_{32}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{33}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + S_{34}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t) \right\}^{1/2} +$$

$$\left. + S_{13}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \right.}$$

$$\left. + \left[S_{41}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{42}(t)[P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{43}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \right. \right.$$

$$\left. + S_{14}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)} \cdot \right.}$$

$$\left. + S_{44}(t)2\sqrt{P_x^{\text{изл}}(t)P_y^{\text{изл}}(t)}\sin\Phi_{xy}(t) \right]^2 \Bigg\}^{1/2} \cdot \sin\Phi_{xy}(t) \Bigg\}^{1/2}. \quad (20)$$

В завершение можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрена возможность использования поляризации электромагнитной волны для радиолокационного распознавания различных объектов некогерентной МРЛС.
2. Обоснован алгоритм распознавания объектов с использованием поляризационных параметров Стокса.
3. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку функциональной схемы МРЛС, реализующий представленный алгоритм радиолокационного распознавания объектов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А.; под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Советское радио, 1966. – 440 с.
2. Поляризация сигналов в сложных транспортных радиоэлектронных комплексах; под ред. Вице-президента Академии транспорта А.И. Козлова и В.А.Сарычева. – СПб.: Хронограф, 1994. – 460 с.
3. Аззам Р. Эллипсометрия и поляризованный свет / Р. Аззам, Н. Башара – Л.: Гидрометеоздат, 1981. – 583 с.

REFERENCES:

1. Canareykin D.B. Polarization of radar signals / Kanareikin D.B., Pavlov N.F., Potekhin V.A. edited. Dulewicz V.E.. (1966): 440 p.
2. The polarization signal in complex vehicle electronic systems. Under the editorial. Vice-President of the Academy of Transport Kozlov A.I. and Sarycheva V.A. (1994): 460 p.
3. Azzam R. Ellipsometry and Polarized Light (1981): 583 p.