

Радиолокационное распознавание навигационных объектов на фоне выпадающих ливневых осадков судовым радиолокационным поляриметром

Д.В. Корбан¹, Г.Г. Щукин²

¹Национальный университет «Одесская Морская Академия», 65029, Одесса, ул. Дидрихсона, д. 8, Украина

²Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д.13

В докладе рассмотрен алгоритм выделения полностью поляризованного компонента эхо-сигнала навигационного объекта из эхо-сигнала частично поляризованной волны, поступающего на вход антенны судового поляриметра, при радиолокационном наблюдении объектов на фоне выпадающих ливневых осадков.

The report describes an algorithm for allocating a fully polarized component of the echo signal of the navigation object from the echo signal is partially polarized wave received at the antenna input of the polarimeter of the ship, with radar surveillance objects in the background drop-down torrential rain.

Процесс рассеяния электромагнитных волн, излучаемых антенной судового радиолокационного поляриметра, соответствует описанию рассеивателя простым многополюсником, входы и выходы которого определяются условиями радиолокационного наблюдения [1].

Рассмотрим наблюдения навигационного объекта судовым радиолокационным поляриметром, имеющим всеполяризованную антенну осесимметричного типа с перестройкой поляризации излучаемой волны на фоне выпадающих осадков определенной интенсивности. Если выпадают морозящие осадки, отражающий объем которых состоит из отражателей сферической формы, то при облучении его волной фиксированной поляризации, отраженный сигнал будет иметь ту же поляризацию, так как время перегруппирования сферических отражателей не влияет на изменение поляризации отраженной волны. При выпадении осадков большой интенсивности, у которых размеры частиц больше миллиметрового и 3-х сантиметрового диапазона длин волн, которые излучают антенны судового радиолокационного поляриметра, облучающая волна входит внутрь отражающего объема выпадающих осадков и возбуждает колебания в каждой отражающей частице и выходя из объема изменяет свою поляризацию, которая несет информацию о внутренней структуре отражающего объема выпадающих осадков. Вышедшая из отражающего объема осадков электромагнитная волна определенной поляризации облучает навигационный объект, объемная поверхность которого представляет собой большую металлическую поверхность с различными отражателями, геометрическую форму которых можно представить в виде вибраторов, цилиндров, конусов и др. Отраженная от такой поверхности навигационного объекта электромагнитная волна формируется рассеивающими центрами боковой поверхности и торцов в узкие направления, а также дифракционными центрами, сосредоточенными на изломах и ребрах объекта, которые являются источниками краевых волн, рассеивающих малую долю энергии во всех направлениях. В соответствии с [1] в процессе рассеяния электромагнитной волны металлической поверхностью навигационного объекта возможен внешний резонанс, в котором основную роль играют ползущие по металлической поверхности объекта электромагнитные волны, поляризационная структура которых до своего отделения от объекта, зависит от геометрии его поверхности и пути, прошедшего волной по металлической поверхности, в том числе и по ее теневой стороне.

При наличии ливневых осадков на пути распространения зондирующей навигационный объект электромагнитной волны, отраженная от объекта электромагнитная волна будет частично поляризована и будет содержать информацию, как об объекте, так и о структуре выпадающих осадков. Навигационный объект может быть не обнаружен судовым поляриметром в зоне выпадающих ливневых осадков. Возникает необходимость в разработке алгоритма радиолокационного распознавания навигационного объекта, находящегося в зоне выпадающих ливневых осадков, по поляризационной структуре электромагнитной волны, поступающей на вход антенны судового поляриметра.

Цель доклада состоит в разработке алгоритма радиолокационного распознавания навигационных объектов на фоне выпадающих ливневых осадков.

Сложность радиолокационного обнаружения эхо-сигнала от навигационного объекта состоит в сложности разделения эхо-сигнала навигационного объекта и эхо-сигнала ливневых осадков. Для решения этой задачи будем использовать поляризацию эхо-сигнала как важнейший источник информации о навигационном объекте и ливневых осадках. Семантика сложного эхо-сигнала соответствует определенной априорной информации о соотношении источников эхо-сигнала с его поляризационными параметрами. Рассмотрим процесс взаимодействия принимаемой и излученной электромагнитных волн с отражающим объемом выпадающих осадков в виде трех матриц:

$$\begin{bmatrix} S_0^{\text{отр}}(t) \\ S_1^{\text{отр}}(t) \\ S_2^{\text{отр}}(t) \\ S_3^{\text{отр}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}(t) & S_{12}(t) & S_{13}(t) & S_{14}(t) \\ S_{21}(t) & S_{22}(t) & S_{23}(t) & S_{24}(t) \\ S_{31}(t) & S_{32}(t) & S_{33}(t) & S_{34}(t) \\ S_{41}(t) & S_{42}(t) & S_{43}(t) & S_{44}(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} S_0^{\text{изл}}(t) \\ S_1^{\text{изл}}(t) \\ S_2^{\text{изл}}(t) \\ S_3^{\text{изл}}(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $S_0(t), S_1(t), S_2(t), S_3(t)$ - параметры Стокса, принимаемой и излучаемой волны антенной судового поляриметра;

$S_{11}(t) - S_{44}(t)$ - коэффициенты матрицы, характеризующие внутреннюю структуру отражающего объема выпадающих ливневых осадков.

Электромагнитная волна, принимаемая антенной судового поляриметра и прошедшая через среду с выпадающими ливневыми осадками до навигационного объекта и обратно к антенне, будет частично поляризована и будет состоять из двух компонентов – полностью поляризованного и неполяризованного. Параметры Стокса для частично поляризованной волны при ее разложении в линейном базисе запишутся в виде:

$$\begin{aligned} S_0(t) &= \langle E_x^2(t) \rangle + \langle E_y^2(t) \rangle = \langle P_x(t) \rangle + \langle P_y(t) \rangle, \\ S_1(t) &= \langle E_x^2(t) \rangle - \langle E_y^2(t) \rangle = \langle P_x(t) \rangle - \langle P_y(t) \rangle, \\ S_2(t) &= 2 \langle E_x(t) E_y(t) \cos[\phi_y(t) - \phi_x(t)] \rangle = 2 \langle \sqrt{P_x(t) P_y(t)} \cos[\Phi_y(t) - \Phi_x(t)] \rangle, \\ S_3(t) &= 2 \langle E_x(t) E_y(t) \sin[\phi_y(t) - \phi_x(t)] \rangle = 2 \langle \sqrt{P_x(t) P_y(t)} \sin[\Phi_y(t) - \Phi_x(t)] \rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

Для частично поляризованной волны имеет место следующее соотношение параметров Стокса [2]:

$$S_0(t)_{un}^2 > S_1(t)^2 + S_2(t)^2 + S_3(t)^2. \quad (3)$$

Для полностью поляризованной компоненты электромагнитной волны, отраженной от навигационного объекта параметры Стокса запишутся в виде:

$$S_0(t)_{mn} = \sqrt{S_1(t)^2 + S_2(t)^2 + S_3(t)^2}. \quad (4)$$

Неполяризованная компонента отраженной волны поступающей на вход антенны судовой РЛС определяется следующим соотношением параметров Стокса:

$$S_0(t)_{nn} = S_0(t)_{\Sigma} - \sqrt{S_1(t)^2 + S_2(t)^2 + S_3(t)^2}. \quad (5)$$

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, фазового состояния и гравитационной скорости 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 волны, а отражающие свойства метеорообъекта представим матрицей рассеяния, состоящей из 16-ти коэффициентов.

С учетом физического смысла параметров Стокса отраженной и облучающей волн, а также коэффициентов матрицы рассеяния отражающего объема ливневых осадков, соотношение (1) запишем в виде четырех линейных уравнений:

$$\begin{aligned} S_0^{отр}(t) &= S_{11}(t)S_0^{изл}(t) + S_{12}(t)S_1^{изл}(t) + S_{13}(t)S_2^{изл}(t) + S_{14}(t)S_3^{изл}(t) = \\ &= S_{11}(t)[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t)] + S_{12}(t)[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t)] + \\ &+ S_{13}(t)2\sqrt{P_x^{изл}(t)P_y^{изл}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + S_{14}(t)2\sqrt{P_x^{изл}(t)P_y^{изл}(t)}\sin\Phi_{xy}(t), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} S_1^{отр}(t) &= S_{21}(t)S_0^{изл}(t) + S_{22}(t)S_1^{изл}(t) + S_{23}(t)S_2^{изл}(t) + S_{24}(t)S_3^{изл}(t) = \\ &= S_{21}(t)[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t)] + S_{22}(t)[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t)] + \\ &+ S_{23}(t)2\sqrt{P_x^{изл}(t)P_y^{изл}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + S_{24}(t)2\sqrt{P_x^{изл}(t)P_y^{изл}(t)}\sin\Phi_{xy}(t), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} S_2^{отр}(t) &= S_{31}(t)S_0^{изл}(t) + S_{32}(t)S_1^{изл}(t) + S_{33}(t)S_2^{изл}(t) + S_{34}(t)S_3^{изл}(t) = \\ &= S_{31}(t)[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t)] + S_{32}(t)[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t)] + S_{33}(t)2\sqrt{P_x^{изл}(t)P_y^{изл}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \\ &+ S_{34}(t)2\sqrt{P_x^{изл}(t)P_y^{изл}(t)}\sin\Phi_{xy}(t), \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} S_3^{отр}(t) &= S_{41}(t)S_0^{изл}(t) + S_{42}(t)S_1^{изл}(t) + S_{43}(t)S_2^{изл}(t) + S_{44}(t)S_3^{изл}(t) = \\ &= S_{41}(t)[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t)] + S_{42}(t)[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t)] + S_{43}(t)2\sqrt{P_x^{изл}(t)P_y^{изл}(t)}\cos\Phi_{xy}(t) + \\ &+ S_{44}(t)2\sqrt{P_x^{изл}(t)P_y^{изл}(t)}\sin\Phi_{xy}(t). \end{aligned} \quad (9)$$

Полностью поляризованная компонента отраженной от навигационного объекта электромагнитной волны запишется через параметры Стокса следующим образом:

$$\begin{aligned}
S_0(t)_{nm} = & \sqrt{S_1(t)^2 + S_2(t)^2 + S_3(t)^2} = \left\{ \left[S_{21}(t) \left[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{22}(t) \left[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{23}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \cos \Phi_{xy}(t) + S_{24}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \sin \Phi_{xy}(t) \right]^2 + \right. \\
& \left. \left. + \left[S_{31}(t) \left[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t) \right] + S_{32}(t) \left[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{33}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \cos \Phi_{xy}(t) + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{34}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \sin \Phi_{xy}(t) \right]^2 + \left[S_{41}(t) \left[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{42}(t) \left[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{43}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \cos \Phi_{xy}(t) + S_{44}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \sin \Phi_{xy}(t) \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (10)
\end{aligned}$$

Полностью неполяризованная компонента эхо-сигнала объема ливневых осадков запишется через параметры Стокса в виде:

$$\begin{aligned}
S_0(t)_{nm} = & S_0(t)_{\Sigma} - \sqrt{S_1(t)^2 + S_2(t)^2 + S_3(t)^2} = S_{11}(t) \left[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t) \right] + \\
& + S_{12}(t) \left[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t) \right] + S_{13}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \cos \Phi_{xy}(t) + \\
& + S_{14}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \sin \Phi_{xy}(t) - \\
& - \left\{ \left[S_{21}(t) \left[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t) \right] + S_{22}(t) \left[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{23}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \cos \Phi_{xy}(t) + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{24}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \sin \Phi_{xy}(t) \right]^2 + \left[S_{31}(t) \left[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{32}(t) \left[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{33}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \cos \Phi_{xy}(t) + S_{34}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \sin \Phi_{xy}(t) \right]^2 + \right. \\
& \left. \left. + \left[S_{41}(t) \left[P_x^{изл}(t) + P_y^{изл}(t) \right] + S_{42}(t) \left[P_x^{изл}(t) - P_y^{изл}(t) \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. + S_{43}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \cos \Phi_{xy}(t) + S_{44}(t) 2 \sqrt{P_x^{изл}(t) P_y^{изл}(t)} \sin \Phi_{xy}(t) \right]^2 \right\}^{1/2}. \quad (11)
\end{aligned}$$

Полностью поляризованная компонента определенного вида поляризации будет соответствовать эхо-сигналу навигационного объекта. Для решения задачи оперативного распознавания навигационного объекта судовым поляриметром используется степень поляризации m частично поляризованной электромагнитной волны, поступающей на вход антенны судового поляриметра:

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

$$\begin{aligned}
& + S_{32}(t) [P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{33}(t) 2 \sqrt{P_x^{\text{изл}}(t) P_y^{\text{изл}}(t)} \cos \Phi_{xy}(t) + S_{34}(t) 2 \sqrt{P_x^{\text{изл}}(t) P_y^{\text{изл}}(t)} \sin \Phi_{xy}(t) \Big]^{1/2} + \\
& \qquad \qquad \qquad + S_{13}(t) 2 \sqrt{P_x^{\text{изл}}(t) P_y^{\text{изл}}(t)} \cos \Phi_{xy}(t) + \\
& + \Big[S_{41}(t) [P_x^{\text{изл}}(t) + P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{42}(t) [P_x^{\text{изл}}(t) - P_y^{\text{изл}}(t)] + S_{43}(t) 2 \sqrt{P_x^{\text{изл}}(t) P_y^{\text{изл}}(t)} \cos \Phi_{xy}(t) + \\
& \qquad \qquad \qquad + S_{14}(t) 2 \sqrt{P_x^{\text{изл}}(t) P_y^{\text{изл}}(t)} \cdot \\
& + S_{44}(t) 2 \sqrt{P_x^{\text{изл}}(t) P_y^{\text{изл}}(t)} \sin \Phi_{xy}(t) \Big]^2 \Big]^{1/2} \\
& \qquad \qquad \qquad \cdot \sin \Phi_{xy}(t) \Big]^{1/2}. \tag{12}
\end{aligned}$$

Для неполяризованной волны $m = 0$, а для полностью поляризованной $m = 1$.

Выводы

1. Рассмотрена возможность использования поляризации электромагнитной волны для радиолокационного распознавания навигационных объектов на фоне выпадающих ливневых осадков
2. Обоснован алгоритм распознавания объектов с использованием поляризационных параметров Стокса.
3. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку функциональной схемы судового поляриметра, реализующего представленный алгоритм радиолокационного распознавания объектов.

Литература

1. Поляризация сигналов в сложных транспортных радиоэлектронных комплексах / Под редак. Вице-президента Академии транспорта А.И. Козлова и В.А.Сарычева. – С.-Пб.: «Хронограф», 1994. – 460 с.
2. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин: под редак. В.Е. Дулевича. – М.: Советское радио, 1966. – 440 с.