

УДК 551.508.85:(551.576+551.577)

**MARINE TARGET ECHO-SIGNAL POLARIZATION
SELECTION WITHIN METEOROLOGICAL DISTURBANCES
BACKGROUND**

**ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ СЕЛЕКЦИЯ ЭХО-СИГНАЛОВ
МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПОМЕХ**

I. A. Knyaz, 2nd Officer

И. А. Князь, 2-й помощник капитана

Ukraine

Украина

ABSTRACT

In the article the principle of the ship's radar polarimeter construction with polarization discrimination of echoes from the object on the background reflections against hydrometeorological interferences. The algorithm of the polarization of the object recognition is by using four Stokes parameters.

Keywords: polarization, hydrometeorological education, Stokes parameters, recognition, likelihood ratio, polarization matrix.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

Гидрометеорологические помехи в виде выпадающих осадков различной интенсивности оказывают с одной стороны маскирующее действие радиолокационному обнаружению объектов, находящихся в зонах осадков вследствие интенсивных отражений радиолокационного сигнала, а с другой стороны приводят к сокращению максимальной дальности обнаружения объектов. В иных случаях эхо-сигналы осадков могут быть приняты за ложные объекты радиолокационного наблюдения. Это непосредственно влияет на безопасность судовождения, особенно в условиях ограниченной видимости, что обуславливает актуальность данного исследования.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Гидрометеорологические помехи в виде выпадающих осадков различной интенсивности оказывают с одной стороны маскирующее действие радиолокационному обнаружению объектов, находящихся в зонах осадков вследствие интенсивных отражений радиолокационного сигнала, а с другой стороны приводят к сокращению максимальной дальности обнаружения объектов. В иных случаях эхо-сигналы осадков могут быть приняты за ложные

объекты радиолокационного наблюдения. Вопросам ослабления радиолокационных сигналов в гидрометеообразованиях и оценке их влияния на работу РЛС посвящено достаточное количество работ как у нас стране, так и за рубежом [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Однако до настоящего времени еще не разработаны методы, позволяющие полностью исключить влияние мешающего действия гидрометеоров на работу судовых РЛС. Одним из эффективных методов борьбы с отражениями от выпадающих осадков на пути судна является метод поляризационной селекции с использованием электромагнитных волн круговой поляризации на излучение и прием. При этом в эхо-сигнале присутствуют обе ортогональные составляющие, которые затем поступают на систему обработки с выделением определенных поляризационных параметров. К таким параметрам будем относить параметры Стокса, которые характеризуются высокой информативностью.

В разработанных к настоящему времени поляризационных методах ослабления мешающего действия выпадающих осадков на работу радиолокационных станций используются взаимные антенны круговой поляризации и невзаимные антенны линейной поляризации [5]. Рассчитанный коэффициент подавления при использовании антенны круговой поляризации и невзаимной линейной поляризации составляет собственно для ливневого и обложного дождя 16,5 и 19,5, 14,0 и 19,0. Эффективность использования указанных антенн зависит от отличия коэффициентов деполяризации эхо-сигналов осадков и объекта.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Задачей данной работы является обоснование принципа построения судового радиолокационного поляриметра с поляризационной селекцией эхо-сигналов от объекта на фоне отражений от гидрометеообразований.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

Мы будем использовать взаимную антенну эллиптической поляризации, излучающую электромагнитную волну круговой поляризации, позволяющую обеспечить поляризационную селекцию эхо-сигналов на фоне осадков выпадающих на пути судна. Эффект ослабления эхо-сигналов от выпадающего дождя при использовании электромагнитной волной круговой поляризации зависит от взаимной антенны круговой поляризации и поляризационных свойств осадков.

При отражении электромагнитной волны круговой поляризации происходит изменение направления вращения вектора электрического поля по отношению к направлению вращения вектора электрического поля облучающей волны. Если вектор поля вращается по часовой стрелке по отношению к наблюдателю, смотрящему на источник излучения, поляризация волны будет правой и наоборот. Вектор поля вращается в сторону составляющей электрического поля, отстающей по фазе на π . При отражении от изотропных капель дождя электромагнитная волна будет иметь круговую

поляризацию с левым направлением вращения при их облучении электромагнитной волной круговой поляризации с правым направлением вращения. При отражении от объекта, имеющего ассиметричную форму, электромагнитная волна будет иметь эллиптическую поляризацию и левое направление вращения электрического вектора поля. Схематически отражение электромагнитной волны от дождя и объекта можно представить в следующем виде (рис.1).

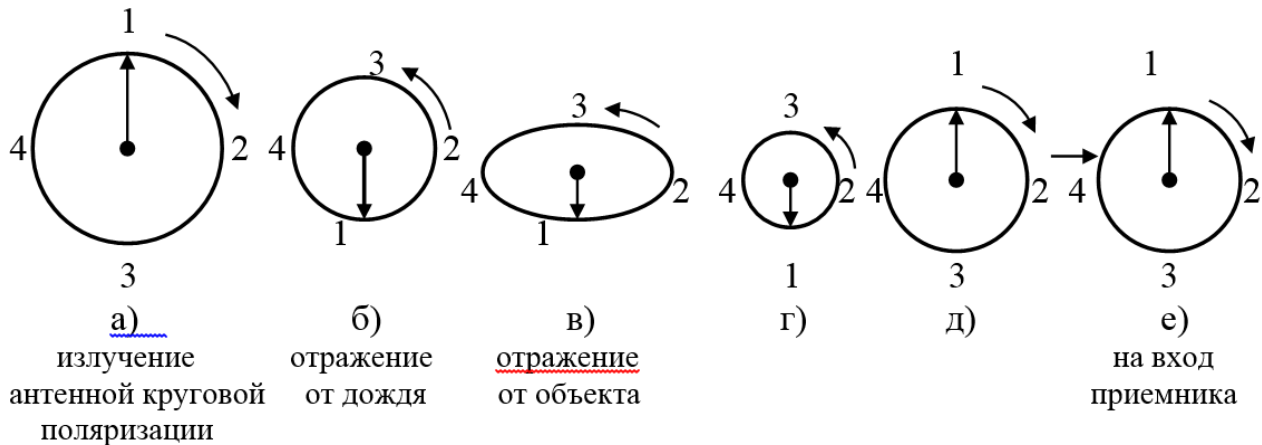


Рис. 1. Векторное представление электромагнитной волны круговой и эллиптической поляризации, отраженной от дождя (б) и объекта (в)

Из рис.1 видно, что отраженную волну эллиптической поляризации можно представить в виде суммы двух векторов с круговой поляризацией, разных по модулю и направлению вращения (в, г, д). Рассмотрим прохождение отраженной электромагнитной волны от выпадающего дождя и объекта через поляризационное устройство судовой РЛС.

При одновременном отражении от дождя и объекта электромагнитная волна с выхода антенны поступает на устройство поляризации, состоящее из 2-х прямоугольных волноводов, в которых помещены два фазовращателя на, два щелевых моста (ЩМ) и поглощающая нагрузка (ПН). Энергия волны, отраженной от дождя, поступает на поглощающую нагрузку и полностью поглощается (рис.2).

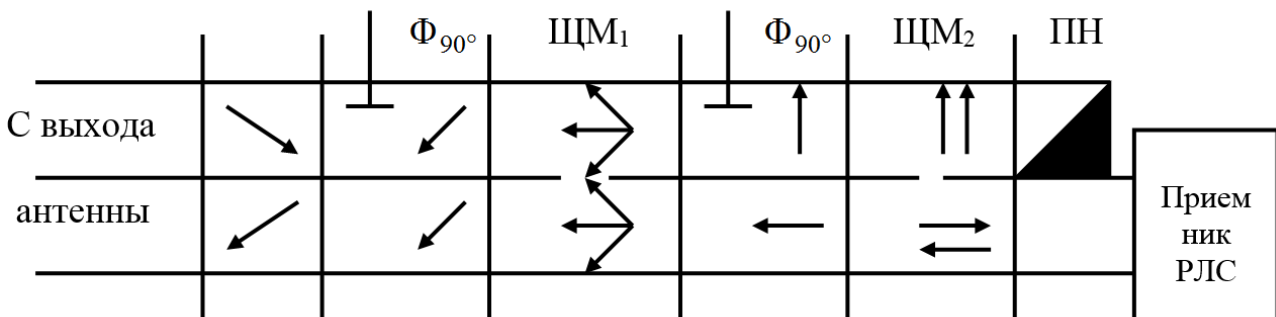


Рис.2. Прохождение электромагнитной волны, отраженной от дождя, через устройство поляризации

Отраженная электромагнитная волна от объекта (судна), имеющая компоненту круговой поляризации (рис.1, 3), которая совпадает по

направлению вращения с направлением вращения излученной волны, полностью проходит на вход приемника РЛС, а затем на индикатор, где и создает отметку от объекта.

При отличии частиц осадков от сферы, часть отраженной энергии проходит на вход приемника вместе с эхо-сигналом от объекта, т.е. происходит неполная компенсация эхо-сигнала от осадков. В этом случае необходимо производить распознавание объектов на фоне отражений от осадков. Алгоритмы обнаружения и различия полезных эхо-сигналов при наличии помех с учетом полностью поляризованных эхо-сигналов объекта и помехи, а также структурные схемы соответствующих устройств рассмотрены в литературных источниках [7, 14, 15, 16]. Однако в реальных условиях поляризация эхо-сигнала, состоящего из сигнала объекта и помехи, может не совпадать с поляризацией приемной антенны. Поляризация эхо-сигнала объекта и помехи тоже может не совпадать. Поэтому возникает необходимость использования оптимального статистического синтеза алгоритмов распознавания поляризованных эхо-сигналов объектов при наличии частично поляризованных помех.

Поляризационное состояние произвольной электромагнитной волны в каждый момент времени можно представить четырьмя статистически независимыми случайными величинами, составляющими четырехмерный случайный вектор [5]. Свойства такого вектора могут быть охарактеризованы поляризационными параметрами Стокса, которые неразрывно связаны с физической природой источников излучения (рассеяния, отражения) радиоволн.

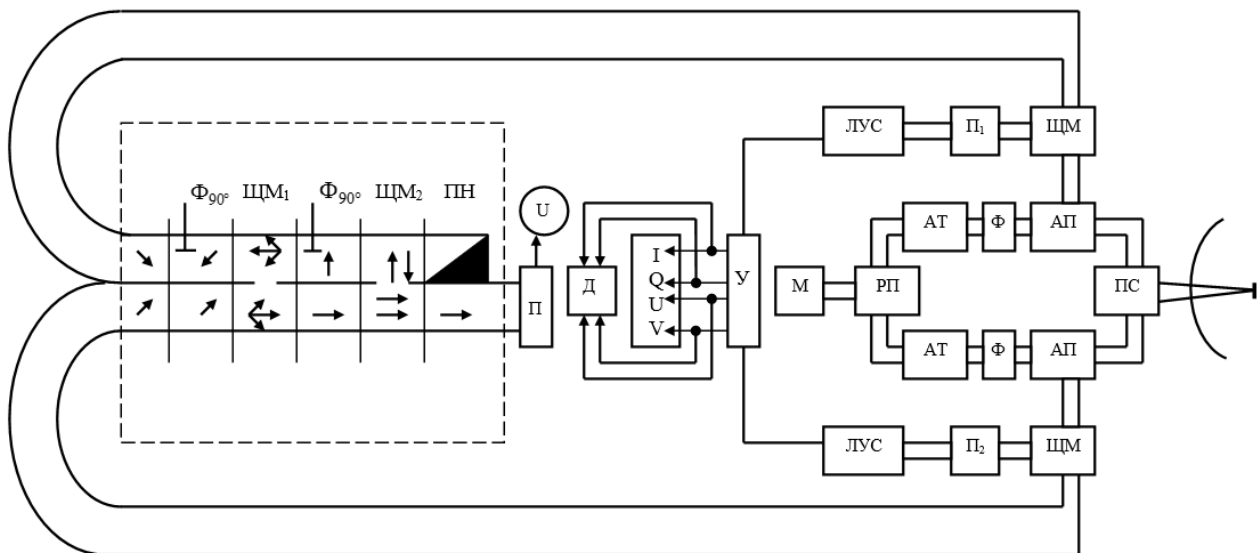


Рис. 3. Функциональная схема судового поляриметра: П – приемник; Д – дисплей компьютера; М – магнетрон; РП – разделитель поляризации; АТ – аттенюатор; Ф – фазовращатель; АП – антенный переключатель; ПС – поляризационный селектор; ЛУС – логарифмический усилитель; У – устройство получения параметров Стокса

Статистические характеристики параметров Стокса частично-поляризованных радиоволн, огибающие ортогонально поляризованных компонент, которые подчиняются логарифмически-нормальному

распределению, также подчиняются логарифмически-нормальному распределению [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23]. Логарифмически-нормальное распределение используется при описании огибающих радиоволн различного происхождения, в том числе и при рассеянии радиоволн атмосферными образованиями [21, 22, 23], а также при отражении от кораблей, где радиолокационный сигнал при равно-вероятностном ракурсе судна рассматривается как сигнал, отраженный от одной плоскости, выбранной из некоторой совокупности и имеющий неровности, глубина которых распределена по нормальному закону. Экспериментальное подтверждение этому представлено в работе [24].

С учетом аналитических выражений совместной плотности вероятности фаз, приведенных в [25] интегральные функции распределения и начальные моменты параметров Стокса, находятся из соотношений (1) и (2):

$$F(I, Q, U, V) = \int_{I, Q, U, V} W(I, Q, U, V) d(I, Q, U, V), \quad (1)$$

$$m_{I, Q, U, V} = \int_0^{\infty} I, Q, U, V W(I, Q, U, V) d(I, Q, U, V). \quad (2)$$

Здесь нижние пределы интегрирования зависят от конкретного вида параметра Стокса.

Будем считать, что электромагнитная волна, отраженная как от гидрометеоров, так и от судна, представляет стационарный эргодический случайный процесс в пространстве и времени, хотя, однако, свойство эргодичности не является следствием стационарности, а случайный процесс является эргодическим, если любая его статистическая характеристика, полученная по множеству возможных реализаций с вероятностью сколь угодно близкой к единице, может быть получена усреднением за достаточно большой промежуток времени из одной единственной реализации случайного процесса. Случайный процесс является стационарным, когда выражение для функции распределения вероятностей любого порядка не зависит от положения начала отсчета времени.

Для решения задачи распознавания статистическим методом будем использовать априорную информацию, которая характеризует объект распознавания и гидрометеорологическую помеху. Совокупностью признаков, характеризующих объект распознавания и помеху, могут являться параметры Стокса, которые образуют вектор признаков распознавания или предиктор, составляющими которого являются сами признаки, т.е. $\bar{X}(I, Q, U, V)$. Вероятностными характеристиками вектора признаков являются условные плотности вероятности вектора признаков, которые записываются для объекта ρ_{Π} и помехи ρ_{Π} в виде:

$$\rho_0(I), \rho_0(Q), \rho_0(U), \rho_0(V), \rho_{\Pi}(I), \rho_{\Pi}(Q), \rho_{\Pi}(U), \rho_{\Pi}(V).$$

Условная плотность совместного распределения признаков распознавания объекта и помехи описывается законом их распределения W , т.е.

$$W_o(I,Q,U,V) \text{ и } W_{\Pi}(I,Q,U,V),$$

или

$$\frac{W_o(I,Q,U,V)/O}{W_{\Pi}(I,Q,U,V)/\Pi}. \quad (3)$$

Закон распределения W предиктора \bar{X} показывает вероятность образования предиктора \bar{X} с данными значениями составляющих, т.е. параметров Стокса, при условии, что отраженный сигнал создан объектом или помехой. Эти законы либо взаимно пересекаются, либо нет (рис.4, а и б).

На рис.4(а) законы не пересекаются и значения \bar{X} , принадлежащие объекту, заключены в интервале $[\bar{X}_1, \bar{X}_2]$, а помехи в интервале $[\bar{X}_3, \bar{X}_4]$.

Для случая (а) задача распознавания решается тривиально и безошибочно. В случае (б) интервал значений предиктора $[\bar{X}_3, \bar{X}_2]$ принадлежит и объекту, и помехе. Поэтому для этого случая необходимо применение специальных статистических методов теории статистических решений.

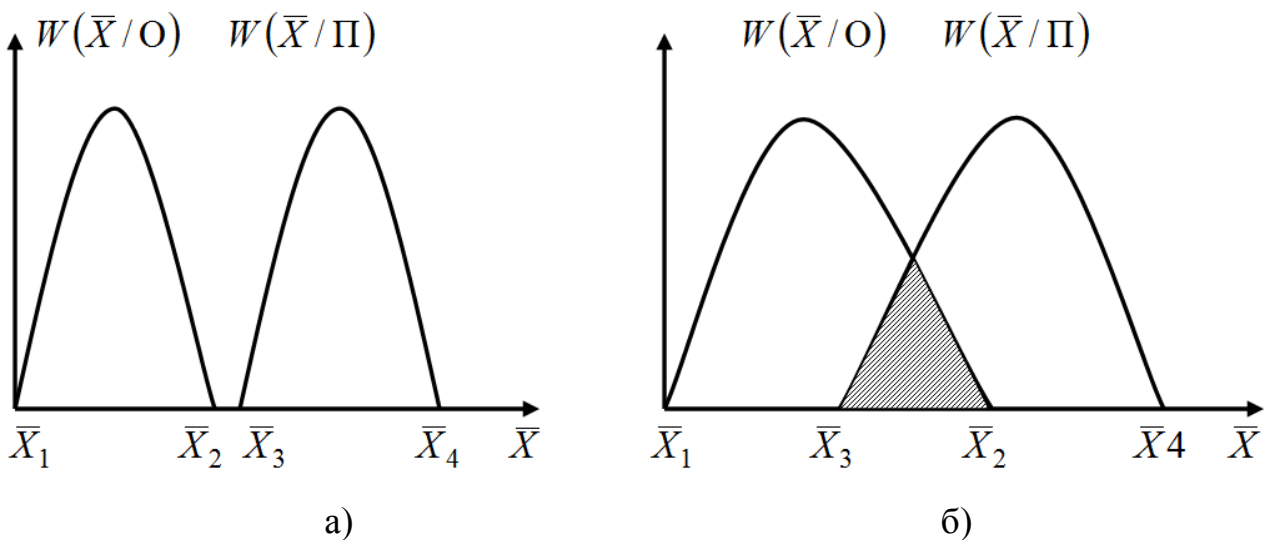


Рис. 4. Законы распределения вектора признаков распознавания для объекта и помехи

Распознавание объекта судовой РЛС при наличии гидрометеоров по измеренным четырем параметрам Стокса является задачей распознавания образов. Эту задачу можно решить на базе теоремы Байеса, или с использованием правила максимума правдоподобия. Будем использовать теорему вероятностей гипотез Байеса, которая позволяет провести переоценку вероятностей гипотез, составляющую полную группу несовместимых гипотез в связи с тем, что произошло некоторое событие A_i . Применим теорему Байеса для двух гипотез «объект» и «помеха», составляющих полную группу несовместимых гипотез, т.е.

$$P(O/A_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{P(O)} - 1 \right) \frac{P(A_i/\Pi)}{P(A_i/O)}}, \quad (4)$$

где O и Π – гипотезы объекта и помехи,

$P(O)$ и $P(\Pi)$ – априорная вероятность объекта и помехи, для которых $P(O) + P(\Pi) = 1$, $P(A_i/\Pi)$ и $P(A_i/O)$ – условные вероятности события A_i .

За A_i принимается тот факт, что значение некоторого параметра Стокса X_1 заключено в пределах

$$\xi_k - \Delta \xi < X_c < \xi_k + \Delta \xi,$$

поэтому

$$\frac{P(A_i/\Pi)}{P(A_i/O)} \approx \frac{\rho_\Pi(\xi_k)}{\rho_O(\xi_k)}, \quad (5)$$

где $\rho_\Pi(\xi_k)$ и $\rho_O(\xi_k)$ – условные плотности распределения параметра X_c в случае помехи и объекта соответственно.

Рассматривая ряд событий A_1, A_2, \dots, A_i и учитывая то, что событие A_1 вследствие независимости событий A_1 и A_2 не изменяет вероятностей $P(A_2/\Pi)$, $P(A_2/O)$, можно найти вероятность гипотезы O при условии, что произошло и событие A_2 , принимая в формуле (4) за априорную вероятность $P(O)$ вероятность $P(O/A_1)$. В случае измерения четырех параметров Стокса ($X_{c1}, X_{c2}, X_{c3}, X_{c4}$) получим:

$$P(O/A_1 A_2 A_3 A_4) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{P(O)} - 1 \right) \prod_{i=2}^4 \frac{P(A_i/\Pi)}{P(A_i/O)}}. \quad (6)$$

Обозначим условную вероятность $P(O/A_1, A_2, A_3, A_4)$ через P_o с учетом (5) получим:

$$P_o = \frac{1}{1 + \frac{P(\Pi)}{P(O)} \prod_{i=1}^4 \frac{\rho_\Pi(\xi_i)}{\rho_O(\xi_i)}}. \quad (7)$$

Значение $P(\Pi)/P(O)$ не оказывает влияние на качество разделения эхо-сигнала от объекта и помехи, а изменяет лишь пороговое значение P_o , при котором производится разделение. Полагая, что $P(\Pi)/P(O) = 1$ вероятность обнаружения объекта можно рассчитать из условия:

$$P_o = \frac{1}{1 + \prod_{i=1}^4 \frac{\rho_{\Pi}(\xi_i)}{\rho_o(\xi_i)}} \quad (8)$$

Производя радиолокационное измерение четырех параметров Стокса, можно по их измеренным значениям рассчитать вероятность распознавания объекта

$$P_o = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{\Pi}(I) \cdot \rho_{\Pi}(Q) \cdot \rho_{\Pi}(U) \cdot \rho_{\Pi}(V)}{\rho_o(I) \cdot \rho_o(Q) \cdot \rho_o(U) \cdot \rho_o(V)}} \quad (9)$$

Зависимость отношений правдоподобия $\rho_{\Pi}(X_c)/\rho_o(X_c)$ от значений X_c может быть построена по данным радиолокационных измерений параметров Стокса эхо-сигналов объекта и гидрометеорологической помехи.

Значения $\prod_{i=1}^4 \frac{\rho_{\Pi}(\xi_i)}{\rho_o(\xi_i)}$ можно рассчитать по следующей формуле:

$$\lg \prod_{i=1}^4 \frac{\rho_{\Pi}(\xi_i)}{\rho_o(\xi_i)} = \lg I + \lg Q + \lg U + \lg V \quad (10)$$

или

$$\prod_{i=1}^4 \frac{\rho_{\Pi}(\xi_i)}{\rho_o(\xi_i)} = I \cdot Q \cdot U \cdot V \quad (11)$$

Так как вероятностными характеристиками совокупности признаков являются условные плотности вероятности вектора признаков, то плотность распределения предиктора \bar{X} описывается законом $W(\bar{X}/O)$ для объекта и законом $W(\bar{X}/\Pi)$ для помехи, которые являются функциями правдоподобия вектора признаков \bar{X} . Закон $W(X/O)$ показывает вероятность образования предиктора \bar{X} с составляющими, имеющими измеренного значения параметров Стокса, если эхо-сигнал создан объектом, а закон $W(X/\Pi)$ - тоже, но эхо-сигнал создан выпадающими осадками. Поэтому отношения правдоподобия являются законами распределения предиктора \bar{X} , т.е.

$$\frac{\rho_{\Pi}(I) \cdot \rho_{\Pi}(Q) \cdot \rho_{\Pi}(U) \cdot \rho_{\Pi}(V)}{\rho_o(I) \cdot \rho_o(Q) \cdot \rho_o(U) \cdot \rho_o(V)} = \frac{W(I/\Pi) \cdot W(Q/\Pi) \cdot W(U/\Pi) \cdot W(V/\Pi)}{W(I/O) \cdot W(Q/O) \cdot W(U/O) \cdot W(V/O)} \quad (12)$$

Тогда вероятность распознавания объекта запишется в виде:

$$P_o = \frac{1}{1 + \frac{W(I/\Pi) \cdot W(Q/\Pi) \cdot W(U/\Pi) \cdot W(V/\Pi)}{W(I/O) \cdot W(Q/O) \cdot W(U/O) \cdot W(V/O)}} \quad (13)$$

Для нахождения вероятности распознавания объекта на фоне помех от выпадающих осадков, необходимо знать законы распределения параметров Стокса для помехи и объекта $W(\bar{X}/\Pi)$ и $W(\bar{X}/O)$.

Для нахождения законов распределения эхо-сигналов параметров Стокса объекта и помехи, которые являются нормальными, воспользуемся правилом максимума правдоподобия

$$\frac{W(\bar{X}/\Pi)}{W(\bar{X}/O)} \geq 1 \quad (14)$$

или с преобразованием левой части, получим

$$\frac{W(I/O)}{W(I/\Pi)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_o} e^{-\frac{(I-m_o)^2}{2\sigma_o^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\Pi} e^{-\frac{(I-m_\Pi)^2}{2\sigma_\Pi^2}}}, \quad (15)$$

$$\frac{W(Q/O)}{W(Q/\Pi)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_o} e^{-\frac{(Q-m_o)^2}{2\sigma_o^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\Pi} e^{-\frac{(Q-m_\Pi)^2}{2\sigma_\Pi^2}}},$$

(16)

$$\frac{W(U/O)}{W(U/\Pi)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_o} e^{-\frac{(U-m_o)^2}{2\sigma_o^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\Pi} e^{-\frac{(U-m_\Pi)^2}{2\sigma_\Pi^2}}},$$

(17)

$$\frac{W(V/O)}{W(V/\Pi)} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_o} e^{-\frac{(V-m_o)^2}{2\sigma_o^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\Pi} e^{-\frac{(V-m_\Pi)^2}{2\sigma_\Pi^2}}}, \quad (18)$$

где I , Q , U , V - измеренные на судовом поляриметре поляризационные параметры Стокса;

m_o , m_{Π} - математические ожидания параметров Стокса объекта и помехи (определяются по массиву экспериментальных измерений);

σ_o^2 , σ_{Π}^2 - дисперсии параметров Стокса объекта и помехи.

Проведя преобразование (14) и (15-18) получим следующие неравенства:

$$\frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_o} e^{a(I)^2 + bI + c} \geq 1, \quad (19)$$

$$\frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_o} e^{a(Q)^2 + bQ + c} \geq 1, \quad (20)$$

$$\frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_o} e^{a(U)^2 + bU + c} \geq 1, \quad (21)$$

$$\frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_o} e^{a(V)^2 + bV + c} \geq 1, \quad (22)$$

где
$$a = \frac{\sigma_o^2 - \sigma_{\Pi}^2}{2\sigma_o^2\sigma_{\Pi}^2}; \quad b = \frac{m_o\sigma_{\Pi}^2 - m_{\Pi}\sigma_o^2}{\sigma_o^2\sigma_{\Pi}^2}; \quad c = \frac{m_{\Pi}^2\sigma_o^2 - m_o^2\sigma_{\Pi}^2}{2\sigma_o^2\sigma_{\Pi}^2}. \quad (23)$$

Если измеренные значения I , Q , U , V такие, что условия (19-22) становятся справедливыми, то принимается решение, что в зоне действия судового поляриметра находится объект, и наоборот, судовой поляриметр видит выпадающие осадки.

Для практического использования соотношений (19-22) проведем их логарифмирование по основанию «e» и получим:

$$a (\lg I)^2 + b \lg I + c \geq \ln \frac{\sigma_o}{\sigma_{\Pi}}, \quad (24)$$

$$a (\lg Q)^2 + b \lg Q + c \geq \ln \frac{\sigma_o}{\sigma_{\Pi}}, \quad (25)$$

$$a (\lg U)^2 + b \lg U + c \geq \ln \frac{\sigma_o}{\sigma_{\Pi}}, \quad (26)$$

$$a (\lg V)^2 + b \lg V + c \geq \ln \frac{\sigma_o}{\sigma_{\Pi}}. \quad (27)$$

Решая эти неравенства относительно I , Q , U , V получим их критериальные значения. Тогда при всех значениях $\lg I \geq \lg I_{кр}$, $\lg Q \geq \lg Q_{кр}$, $\lg U \geq \lg U_{кр}$, $\lg V \geq \lg V_{кр}$ неравенства (24-27) будут справедливыми. Тогда измеренные значения параметров I , Q , U , V сравниваются с их критериальными значениями $I_{кр}$, $Q_{кр}$, $U_{кр}$, $V_{кр}$.

Если $I, Q, U, V > I_{кр}, Q_{кр}, U_{кр}, V_{кр}$, то принимается решение, что судовой поляриметр сопровождает объект, и наоборот, если $I, Q, U, V < I_{кр}, Q_{кр}, U_{кр}, V_{кр}$, что на экране судового поляриметра имеются отметки от выпадающих осадков, т.е. объект отсутствует. В комплексном виде алгоритм решения задачи распознавания объекта при наличии помехи в виде выпадающих осадков можно представить в следующей последовательности:

1. Излучаемую волну представим в виде матрицы параметров Стокса в круговом базисе

$$\begin{bmatrix} I_{изл} \\ 0 \\ 0 \\ V_{изл} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

2. При наличии объекта и помехи в виде выпадающих осадков отраженный сигнал также представим в виде матрицы

$$\begin{bmatrix} I_{отр}(t)_{о+п} \\ Q_{отр}(t)_{о+п} \\ U_{отр}(t)_{о+п} \\ V_{отр}(t)_{о+п} \end{bmatrix}. \quad (29)$$

3. Если помеха отсутствует, то отраженный сигнал от объекта запишется матрицей в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} I_{отр}(t)_о \\ Q_{отр}(t)_о \\ U_{отр}(t)_о \\ V_{отр}(t)_о \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Считаем, что элементы поляризационной матрицы гидрометеорологической помехи являются нормальными случайными функциями и их средние значения равны нулю.

4. Для решения задачи распознавания объекта на фоне гидрометеорологических помех, т.е. для обнаружения эхо-сигнала объекта образуем отношение правдоподобия в виде:

$$D(I_{отр}, Q_{отр}, U_{отр}, V_{отр}) = \frac{W_{о+п}(I_{отр.о+п}, Q_{отр.о+п}, U_{отр.о+п}, V_{отр.о+п})}{W_{п}(I_{отр.п}, Q_{отр.п}, U_{отр.п}, V_{отр.п})} =$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^4 (\sigma_{I_{o+\pi}} \sigma_{Q_{o+\pi}} \sigma_{U_{o+\pi}} \sigma_{V_{o+\pi}})} \cdot \\
 &\quad \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^4 (\sigma_{I_{\pi}} \sigma_{Q_{\pi}} \sigma_{U_{\pi}} \sigma_{V_{\pi}})} \cdot \\
 &\quad \frac{\exp - \left[\frac{(I_{o+\pi} - m_{I_{o+\pi}})^2}{2 \sigma_{I_{o+\pi}}^2} \cdot \frac{(Q_{o+\pi} - m_{Q_{o+\pi}})^2}{2 \sigma_{Q_{o+\pi}}^2} \cdot \frac{(U_{o+\pi} - m_{U_{o+\pi}})^2}{2 \sigma_{U_{o+\pi}}^2} \cdot \frac{(V_{o+\pi} - m_{V_{o+\pi}})^2}{2 \sigma_{V_{o+\pi}}^2} \right]}{\exp - \left[\frac{(I_{\pi} - m_{I_{\pi}})^2}{2 \sigma_{I_{\pi}}^2} \cdot \frac{(Q_{\pi} - m_{Q_{\pi}})^2}{2 \sigma_{Q_{\pi}}^2} \cdot \frac{(U_{\pi} - m_{U_{\pi}})^2}{2 \sigma_{U_{\pi}}^2} \cdot \frac{(V_{\pi} - m_{V_{\pi}})^2}{2 \sigma_{V_{\pi}}^2} \right]}
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

5. Если $D \geq D_0$, то отраженный сигнал создан объектом, если $D < D_0$ - отраженный сигнал создан помехой. Здесь D_0 - порог, определяемый критерием выбора решения.

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

1. Разработанная функциональная схема радиолокационного судового поляриметра позволяет с высокой вероятностью обнаружить и распознать объект на фоне выпадающих осадков.

2. Разработан вероятностно-статистический метод распознавания объекта на фоне гидрометеорологических помех, основанный на одновременном измерении 4-х параметров Стокса.

3. Разработанный алгоритм радиолокационного обнаружения и распознавания объектов на фоне гидрометеорологических помех позволяет с вероятностью до 99% обнаруживать и распознавать объекты судовыми радиолокационными поляриметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красюк Н.П. Влияние тропосферы и подстилающей поверхности на работу РЛС / Н.П.Красюк, В.Л.Коблов, В.Н.Красюк. – М.: «Радио и связь». 1988. – 213 с.
2. Абрамов В.В. Электродинамическая модель помехи от гидрометеоров / Абрамов В.В. // Вопросы радиоэлектроники. – Вып. 15. – 1981. – С.92-97.
3. Бин Б.Р. Радиометеорология / Бин Б.Р., Даттон Е. Дж.: Пер. с англ. под ред. А.А. Семенова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. - 362 с.
4. Красюк Н.П. Корабельная радиолокация и метеорология / Н.П. Красюк, В.И. Розенберг – Л.: Судостроение, 1970. – 328 с.
5. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б.Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин – М.: Изд-во «Советское радио», 1966. – 440 с.

6. Канарейкин Д.Б. Морская поляриметрия / Д.Б. Канарейкин, В.А. Потехин, И.Ф. Шишкин – Л.:Судостроение, 1968. – 327 с.
7. Вайнштейн Л.А. Выделение сигналов на фоне случайных помех / Л.А.Вайнштейн, В.Д. Зубаков – М.: Изд-во «Советское радио», 1960. – 175 с.
8. Байрашевский А.М. Судовые радиолокационные системы / А.М. Байрашевский, Н.Т. Ничипоренко – М.: Транспорт, 1982 – 311 с.
9. Применение цифровой обработки сигналов под редакцией Э.Опенгейна. – М.: Мир, 1980. – 552 с.
10. Dilworth I.J. Depolarization due to snow at 11,6 GHz / Dilworth I.J., Evans B.G. – Electron Lett. – 1978. – Vol.14. – P.315-317.
11. Dougherty H.T. Recent Progres in Duct Propagation Predictions. – IEEE Trans. – 1979. – Vol.AP-27, № 4. – P.542-548.
12. Ihara T. Measurement of depolarization due tu snorufall at 34,5 G Hz / Ihara T., Furuhami I., Tohma K // Traus. Inst. Electron Commun. Eng. Japan. – 1982. – Vol. E65. – P.16-22.
13. Rotheram B.A. Radioware propagation in the evaporation duct / Rotheram B.A. – Marconi Rev. – 1974. – Vol.37. – № 192. – P.18-40.
14. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ / Андерсон Т. Физматгиз, 1963. - 154 с.
15. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер: пер. с англ. под ред. А.Н.Колмогорова. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1948. – 171 с.
16. Copeland I.R. Radar Target Classification by Polarization Properties / Copeland I.R. // Prog. of the IRE, 1960. – V11. - № 1. – P.1290-1296.
17. Большаков И.А. Статистические проблемы выделения потока сигналов из шума / Большаков И.А. - М.: Изд-во «Советское радио», 1969. – 464 с.
18. Долуханов М.П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн / Долуханов М.П. – М.:Изд-во «Связь», 1971. – 184 с.
19. Тихонов В.И. Выбросы случайных процессов / Тихонов В.И. – М.: Изд-во «Наука», 1970. – 392 с.
20. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро: пер. с англ. под ред. В.В.Налимова – М.: Изд-во «Мир», 1969. – 395 с.
21. Beckmann P. Amplitude-Probability distribution of atmospheric radio noise / Beckmann P // Radio Science Journal of Research National Burean of Standarts, V 68D, № 5 – 1964. – P.174-186.
22. Morner F. An investigation of atmospheric noise at very low reguencies / Morner F., Harwood I. // Proc. IEE, 103 B, 1956. – P.743-751.

23. Crichlow W.Q. Determination of the amplitude-probability distribution of atmospheric radio noise from statistical moments / Crichlow W.Q., Roubigue C.I., Spaulding A.D., Beery W.M. // I. Res № BS 64 D (Radio Prop), №1, 1960. – P.49-56.
24. Heidbreder G.R. Detection probabilities for Log normally distributed Signals / Heidbreder G.R., Mitchell R. L. // IEEE Trans. AES-3, №1, 1967. – P.89-101.
25. Kennedy R.W. The spatial and spectral characteristics of the radar cross section of satellite type targets / Kennedy R.W. // Air Force Avionics Lab., Wright-Patterson AFB, Ohio, Tech, Rept, AFAL-TR-66-77, 1966, March.