

УДК 551.508.85:(551.576+551.577)

Князь И.А.,  
2-й помощник капитана

### ВЛИЯНИЕ ВЫПАДАЮЩИХ ОСАДКОВ НА РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ СУДОВЫМИ НЕКОГЕРЕНТНЫМИ ДВУХКАНАЛЬНЫМИ РЛС

Выпадающие осадки различной интенсивности на пути судна оказывают существенное влияние на дальность обнаружения объектов судовыми некогерентными РЛС. Это влияние выражается в ослаблении радиоволн осадками по трассе распространения, а также в отражении излучаемых антенной РЛС электромагнитных волн от частиц выпадающих осадков в районе нахождения объекта. Радиолокационный контраст объекта на фоне выпадающих осадков определенной интенсивности может резко понизиться и сократится максимальная дальность его обнаружения, т.е. ухудшаются условия радиолокационного наблюдения объекта.

Для индикаторов РЛС в соответствии с [90] радиолокационный контраст отметки от объекта, находящегося в зоне выпадающих осадков, определяются из условия:

$$K_o = 1 - \frac{1}{1 + \frac{P_o}{P_\phi}}, \quad (1)$$

где  $P_o$  и  $P_\phi$  - мощность эхо-сигналов объекта и фона соответственно.

Мощность эхо-сигнала объекта находится с помощью следующей формулы [66]

$$P_o = \frac{P_n G^2 \lambda^2 \sigma_o}{(4\pi)^3 R^4} K_{oc} C_1 = P_n \frac{\sigma_o}{R^4} K_{oc} C_1, \quad (2)$$

а мощность эхо-сигнала выпадающих осадков (гидрометеорологического фона) запишется в виде:

$$P_\phi = \frac{\pi^3 P_n G^2 \theta^2 h}{512 R^2 \lambda^2} \sum_{d_i} N(d_i) d_i^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 K_{oc} K_s C_1 C_2 = P_n \frac{Z_\phi}{R^2} K_{oc} K_s C_1 C_2, \quad (3)$$

В уравнениях (2) и (3) :

$P_{\text{и}}$  - излучаемая мощность, Вт;

$G$  - коэффициент усиления антенны;

$\lambda$  - длина волны, см;

$\theta$  - ширина диаграммы направленности антенны, град;

$h$  - пространственная протяженность импульса, м;

$R$  - расстояние до объекта и фона, км;

$K_{\text{oc}}$  - коэффициент ослабления газами атмосферы и осадками;

$K_3$  - коэффициент заполнения радиолокационного объема частицами осадков;

$C_1$  и  $C_2$  - размерные коэффициенты;

$m$  - комплексный показатель преломления вещества частиц осадков (вода, лед, снег);

$\sigma_0$  - эффективная площадь рассеяния объекта;

$\Pi_3$  - энергетический потенциал РЛС.

Величина

$$\sum_q N(d_i) d_i^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = Z_{\Phi} \quad (4)$$

является радиолокационной отражаемостью гидрометеорологического фона, которая связана с интенсивностью  $I$  выпадающих осадков следующей зависимостью:

$$Z = A I^b, \quad (5)$$

где  $A$  и  $b$  - коэффициенты, значения которых для дождей находятся в пределах  $9 \leq A \leq 2000$  и  $b = 1,82$ .

Тогда с учетом (4) и (5), уравнение (3) запишется в виде:

$$P_{\Phi} = \Pi_3 \frac{I^{1,6}}{R^2} K_{\text{oc}} K_3 C_1 C_2 \quad (6).$$

Считая  $\Pi_3$ ,  $K_{\text{oc}}$ ,  $K_3$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  - известными, подставим (2) и (6) в (1), тогда выражение для контраста объекта получим в следующем виде:

$$K_0 = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\sigma_0}{R^2}^{1,6}} \quad (7)$$

Анализ выражения (7) показывает, что с увеличением интенсивности выпадающих осадков, на фоне которых наблюдается объект с эффективной поверхностью рассеяния  $\sigma$  и уменьшением его отражающих свойств, контраст его изображения на индикаторе РЛС уменьшается. Для разных объектов, у которых различные  $\sigma$ , при одной и той же интенсивности выпадающих осадков на входе приемника судовой РЛС будут различные отношения  $\frac{P_o}{P_\phi}$ .

При известном энергетическом потенциале судовой РЛС, ЭПР объекта, интенсивности выпадающих осадков на измеренном расстоянии  $R$ , на котором находится объект радиолокационного наблюдения, минимальное отношение  $\frac{P_o}{P_\phi}$ , при котором еще возможно получить контраст изображения объекта на индикаторе судовой РЛС, легко вычисляется по следующему соотношению:

$$\left( \frac{P_o}{P_\phi} \right)_{\min} = \frac{\sigma_o}{R^2 |^{1,6}} \quad (8)$$

Из (8) видно, что для данного объекта и измеренной интенсивности выпадающих осадков отношение  $\left( \frac{P_o}{P_\phi} \right)_{\min}$  обратно пропорционально  $R^2$ , т.е. отношению  $\left( \frac{P_o}{P_\phi} \right)_{\min}$  соответствует такое  $R_{\text{пред}}$ , при котором объект еще различим на фоне эхо-сигнала выпадающих осадков. При превышении объектом  $R_{\text{пред}}$ , он уже не будет обнаруживаться судовой РЛС, т.е.

$$\frac{P_o}{P_\phi} = \frac{\sigma_o}{R_{\text{пред}}^2 |^{1,6}}, \quad (9)$$

$R_{\text{пред}}$  назовем дальностью маскировки объекта радиолокационного наблюдения выпадающими осадками, которая находится из уравнения (9)

$$R_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{\sigma_o}{\frac{P_o}{P_\phi} |^{1,6}}} \quad (10)$$

или с учетом энергетического потенциала РЛС, куда входит отношение  $\frac{P_o}{P_\phi}$ ,  $R_{\text{пред}}$  запишется в виде:

$$R_{\text{пред}} = \sqrt{\frac{\sigma_o}{|^{1,6}}} \cdot \Pi'_3, \quad (11)$$

$$\text{где } \Pi'_3 = \Pi_3 \frac{P_o}{P_\phi}, \text{ а } \Pi_3 = \frac{\pi^3 P_{\text{п}} G^2 \theta^2 h}{512 \lambda^2}.$$

Формула (11) показывает, что для определения максимальной дальности радиолокационного обнаружения объекта достаточно вычислить лишь отношение  $\frac{\sigma_o}{|^{1,6}}$ , т.к. все остальные величины известны.

Определим дальность маскировки объектов морского транспорта выпадающими осадками. Расчет проведем для транспорта малого тоннажа  $\sigma_o = 150 \text{ м}^2$ , транспорта среднего тоннажа  $\sigma_o = 7500 \text{ м}^2$ , транспорта большого тоннажа  $\sigma_o = 15000 \text{ м}^2$  и катера  $\sigma_o = 150 \text{ м}^2$ , т.е. получим зависимость  $R_{\text{пред}} = f(l)$ . Результаты расчета представлены в табл. 1.

Полученные результаты позволяют определять дальность маскировки объекта радиолокационного наблюдения осадками определенной интенсивности для судовой РЛС, работающей в сантиметровом диапазоне длин волн.

Представленная методика заключается в нахождении для наблюдаемого объекта и данных метеоусловий значения  $R_{\text{пред}}$ , с использованием формулы (11) с известным энергетическим потенциалом судового радиолокатора, а затем прогнозирования радиолокационной наблюдаемости объекта по его отражающим свойствам на фоне выпадающих осадков определенной интенсивности путем сравнения  $R_{\text{пред}}$  с  $R$  объекта в метеообразовании, которая измеряется судовым

радиолокатором. Техническую реализацию задачи обнаружения объекта в выпадающих осадках на  $R_{\text{пред}}$  по пути судна судовым радиолокатором будем осуществлять с помощью щелевой антенны круговой поляризации (рис.1).

Таблица 1 - Результаты расчетов  $R_{\text{пред}}$  в зависимости от интенсивности выпадающего дождя и тоннажа транспорта

$I$ , мм/час	$\sigma_o = 150\text{м}^2$	$\sigma_o = 150\text{м}^2$	$\sigma_o = 7500\text{м}^2$	$\sigma_o = 15000\text{м}^2$
0,25	1430,2	1751,7	12385,4	17515,9
1,25	392,9	481,3	3403,7	4813,7
2,5	226,1	276,4	1956,1	2765,9
12,5	62,0	76,1	539,6	763,3
25,0	35,7	43,7	309,7	438,0
50,0	20,7	24,9	177,7	251,5
100,0	11,8	14,5	102,0	144,3
150,0	8,5	10,4	73,8	104,3
200,0	6,8	8,3	58,7	83,2
250,0	5,6	7,0	49,1	69,6
300,0	4,9	6,0	42,5	60,2

Задача обнаружения объекта на фоне выпадающих осадков состоит в использовании поляризационной селекции, позволяющей по данным о поляризации излученной волны и эхо-сигнала выделить объект из гидрометеорологического фона. Будем исходить из того, что поляризационные характеристики объекта и помехи нам известны. Поэтому поляризацию облучающей волны выбираем из условия получения максимального эхо-сигнала объекта с учетом поляризации антенны судовой РЛС. Будем использовать в антенне судового поляриметра излучатель в виде крестообразной щели в широкой стенке прямоугольного волновода с основным типом волны  $TE_{01}$ , с продольной  $H_z$  и поперечной  $H_x$  компонентами магнитного поля.

Эти компоненты отличаются по фазе друг от друга на  $90^\circ$  и записываются в виде [3]:

$$H_x = H_o \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \sin \frac{\pi x}{a}, \quad (12)$$

$$H_y = -j H_0 \left( \frac{\lambda}{2a} \right) \cos \frac{\pi x}{a}, \quad (13)$$

где  $H_0$  - постоянная величина;

$\lambda$  - длина волны в свободном пространстве;

$a$  - ширина волновода;

$x$  - поперечная координата.

В широкой стенке прямоугольного волновода прорезаны две перпендикулярные щели резонансной длины с коническим профилем. Щели вырезаются в точке прямоугольного волновода, в которой  $|H_z| = |H_x|$ , а их координаты определяются соотношением

$$x = \frac{a}{\pi} \operatorname{arctg} \left[ \pm \sqrt{\left( \frac{2a}{\lambda} \right)^2 - 1} \right] \quad (14)$$

Такие щели излучают электромагнитную волну круговой поляризации.

В режиме приема анализируемая в общем случае эллиптически поляризованная волна, представляемая как две волны круговой поляризации с противоположным направлением вращения векторов поля возбуждает две волны, которые распространяются в прямоугольном волноводе в разные стороны. Направления распространения волн определяются направлениями вращения, а их амплитуды и фазы – амплитудами и фазами круговых компонент анализируемой волны (рис. 1).

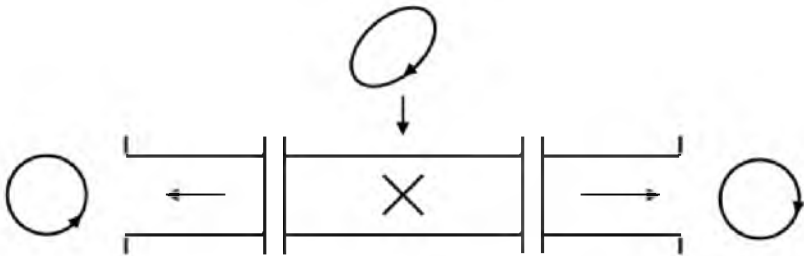


Рис.1 Волноводный излучатель в режиме приема

Указанное свойство щели в режиме приема является следствием того, что в режиме излучения направление вращения вектора поля

излучаемой волны зависит от направления распространения волны в волноводе или от места расположения крестообразной щели относительно осевой линии при выбранном направлении распространения волны.

Если частицы осадков имеют сферическую форму, то нулевой поляризацией для них является круговая поляризация, т.к. при отражении она изменяет направление вращения, т.е. становится ортогональной. Поэтому отраженная волна круговой поляризации от осадков со сферической формой частиц через щель проходит только в левый волновод, в правый волновод энергия не проходит (свойство щели).

Если форма выпадающих осадков отличается от сферы, то отраженная волна будет иметь эллиптическую поляризацию и ее можно представить в виде двух волн круговой поляризации с противоположным направлением вращения векторов поля с определенными амплитудами и разностью фаз в  $90^\circ$  между ними.

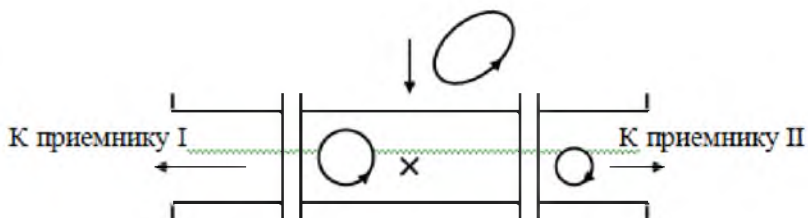


Рис. 2. Прием эхо-сигнала от несферических частиц выпадающих осадков

Причем основная часть отраженной энергии в виде волны круговой поляризации с левым направлением вращения поступит на приемник I, а незначительная часть энергии волны образует волну круговой поляризации с правым направлением вращения и поступит на вход приемника II (рис.2). Излучаемая волна имеет правое направление вращения вектора поля.

Эхо-сигналы объектов в общем виде эллиптически поляризованы, однако в них можно выделить пары плоских участков, перпендикулярных друг другу и образующих двугранный уголкового отражатель, создающий эхо-сигнал круговой поляризации, с которым антенна согласована, т.к. направление вращения при двукратном отражении меняется дважды [4]. Энергия эхо-сигнала круговой поляризации от объекта проходит по волноводу к приемнику II (рис.2).

Эхо-сигналы круговой поляризации от выпадающих осадков после их преобразования и усиления приемником I используется для измерения их интенсивности и координат.

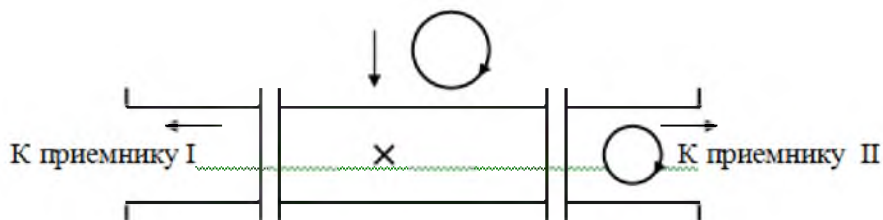


Рис.3. Прием эхо-сигнала объекта

Функциональная схема экспериментального макета локатора с излучателем в виде крестообразной щели в широкой стенке прямоугольного волновода представлена на рис.4.

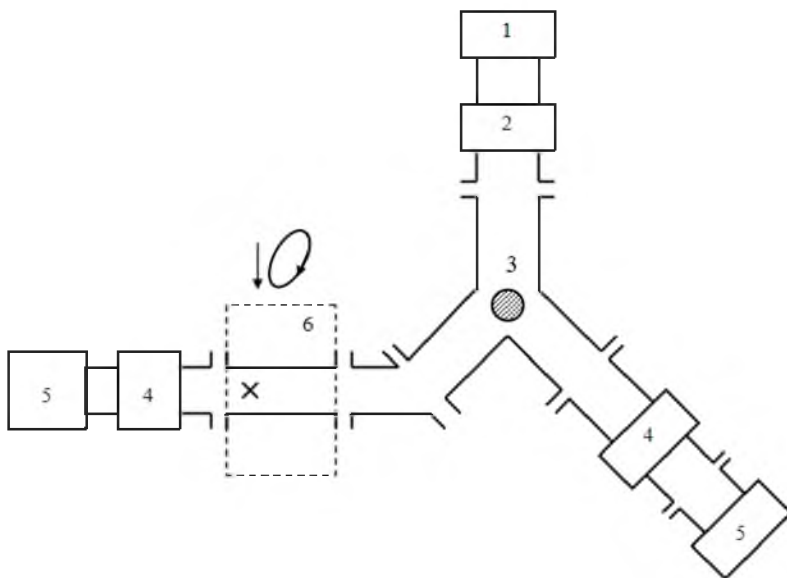


Рис.4. Функциональная схема экспериментального макета судового радиолокатора: 1 – передатчик; 2 – разрядник блокировки передатчика; 3 – У-циркулятор; 4 – разрядники защиты приемников; 5 – приемники I и II каналов; 6 - излучатель



### Выводы

1. Рассмотрено влияние выпадающих осадков на радиолокационное обнаружение морских объектов судовыми двухканальными радиолокаторами.
2. Получена предельная дальность маскировки морских объектов выпадающими осадками на пути судна.
3. Обоснован принцип построения судовой двухканальной РЛС, реализующей обнаружение объектов, находящихся в зоне выпадающего дождя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boerner W.M. Wei-Ling Yan, an Oong Xi, Yoshio Yamaguchi. Basic concepts of radar polarimetry / Boerner W.M. – Direct and Inverse Methods in Radar Polarimetry, part 1.
2. Современная радиолокация. Анализ, расчет и проектирование систем. Пер. с англ. Под ред. Ю.Б. Кобзарева. – М.: Изд-во «Советское радио», 1969. – 704 с.
3. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. – М.: Изд-во «Советское радио», 1966. – 440 с.
4. Теоретические основы радиолокации. Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: «Советское радио», 1978. – 607 с.