

УДК 551.508.85 (551.576 +551.577) DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.192-200

**STATISTICAL RADIO-LOCATION CHARACTERISTICS OF ATMOSPHERIC FORMATIONS AND OBJECTS OBSERVED ON THEIR BACKGROUND****СТАТИСТИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТМОСФЕРНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОБЪЕКТОВ, НАБЛЮДАЕМЫХ НА ИХ ФОНЕ****V.Yu. Revenko, *PhD student*****В. Ю. Ревенко, аспирант***National University «Odessa Maritime Academy», Ukraine**Национальный университет «Одесская морская академия», Украина***ABSTRACT**

Ship's radar systems operating at wavelengths of 3 cm and 10 cm allow, along with remote observation of navigation objects, to receive information on the state of the atmosphere, the sea and the earth's surface. However, ship radars do not receive such information, which affects the safety of navigation. The atmosphere and atmospheric formations, as the environment in which radar signals propagate, as well as the underlying surface (sea water and land), on the one hand, significantly affect the effectiveness of radar observation of navigation objects in the vessel's path, and on the other hand, radar information on the state of the atmosphere and the underlying surface allows the crew to make the right decisions in a timely manner when hazardous meteorological and oceanological phenomena occur.

Due to the fact that atmospheric formations are a radar object, consisting of elementary reflectors that have, in general, non-spherical shape and chaotic movement in space, they create background echo signals on the indicators that prevent radar observation of navigation objects, and at the output of the ship's radar receiver, the echo signals of fluctuating and atmospheric objects are not separated and are not separately observed. To assess atmospheric and fluctuating objects, knowledge of their statistical radar characteristics is necessary.

The theoretical basis of this estimate may be the correlation functions of radar signals reflected from atmospheric formations and the underlying surface. Considering the fact that the speeds of individual reflectors and their movements are assumed to be stationary random processes.

The article discusses the correlation functions of these objects, which will later be used to obtain their radar information and its presentation on the ship's radar indicators and the ship's computer display.

**Keywords:** navigation, fluctuating and atmospheric objects, correlation functions, echo-signals, linear and quadratic detectors, receiver noise.

## РЕФЕРАТ

Суднові радіолокаційні комплекси, які працюють на довжинах хвиль 3 см і 10 см, дозволяють разом з дистанційним спостереженням навігаційних об'єктів, отримувати інформацію про стан атмосфери, морської і земної поверхні. Проте суднові РЛС таку інформацію, що впливає на безпеку судноводіння, не отримують. Атмосфера і атмосферні утворення, як середовище, в якому поширюються радіолокаційні сигнали, а також підстилаюча поверхня (морська вода і суша) з одного боку істотним чином впливають на ефективність радіолокаційного спостереження навігаційних об'єктів на шляху судна, а з іншого боку радіолокаційна інформація про стан атмосфери і підстилаючої поверхні дозволяє екіпажу судна своєчасно приймати правильні рішення при виникненні небезпечного метеорологічного і океанологічного явищ.

У зв'язку з тим, що атмосферні утворення є, у радіолокаційному відношенні, об'єктом який складається з елементарних відбивачів, що мають, в загальному випадку, несферичну форму і хаотичне переміщення в просторі, то вони створюють на індикаторах фонові луно-сигнали, що заважають радіолокаційному спостереженню навігаційних об'єктів, а на виході приймача суднової РЛС луно-сигнали флюктуруючих і атмосферних об'єктів не розділені і окремо не спостерігаються. Для оцінки атмосферних і флюктуруючих об'єктів потрібні знання їх статистичних радіолокаційних характеристик. Теоретичною базою цієї оцінки можуть служити кореляційні функції радіолокаційних сигналів, відбитих від атмосферних утворень і підстилаючої поверхні. З урахуванням того, що швидкості окремих відбивачів і їх переміщення є по припущенню стаціонарними випадковими процесами.

У статті розглянуті кореляційні функції цих об'єктів, які надалі будуть використані для отримання їх радіолокаційної інформації і її представлення на індикаторах суднової РЛС і дисплеї суднового комп'ютера.

**Ключові слова:** навігаційні, флюктуруючі атмосферні об'єкти, кореляційні функції, луно-сигнали, лінійний і квадратичний детектори, шум приймача.

### **Постановка проблемы в общем виде и ее связь с научными и практическими задачами**

Дистанционное радиолокационное наблюдение навигационных объектов судовой РЛС производится при различных состояниях природной среды, информация о которой на выходе приемника РЛС отсутствует, что существенно снижает безопасность судовождения, особенно при возникновении и развитии таких опасных явлений погоды, как торнадо, циклоны, атмосферные фронты, волнения. Поэтому возникает необходимость в заблаговременном получении радиолокационной информации об опасных атмосферных процессах, что в настоящее время является проблемой, которую необходимо решать.

### **Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, и выделение нерешенных вопросов**

Методы определения свойств шумового радиолокационного сигнала, поступающего на вход РЛС, используют закон распределения значений сигнала, корреляционную функцию и энергетический спектр [1-3]. Однако до настоящего времени не использована корреляционная функция конкретно для каждого объекта, эхо-сигналы которого поступают на вход приемника судовой РЛС и не используются в качестве информационных.

### **Формулировка целей статьи (постановка задачи)**

Цель данной статьи – теоретический анализ корреляционных функций флуктуирующих и атмосферных объектов, позволяющих решить задачу обнаружения данных объектов по их эхо-сигналам на фоне внутренних шумов радиолокационного приемника судовой РЛС.

### **Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов**

Судовые РЛС – это импульсные некогерентные радиолокаторы, антенны которых излучают импульсные сигналы высокой частоты, которые можно представить в виде [1]:

$$E_{изл}(t) = E_{изл} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad \text{при} \quad -\frac{\tau_u}{2} \leq t \leq \frac{\tau_u}{2} \quad (1)$$

и в виде:

$$E_{изл}(t) = 0, \quad \text{если} \quad |t| > \frac{\tau_u}{2}, \quad (2)$$

где  $E_{изл}$  - амплитуда излучаемого сигнала;

$t$  - время;

$\omega_0$  - круговая частота сигнала;

$\varphi_0$  - начальная фаза сигнала;

$\tau$  - длительность излучаемого импульса.

Навигационные объекты наблюдаются судовой РЛС на фоне атмосферных образований и флуктуирующих объектов и собственных шумов приемника. Атмосферное образование состоит из множества частиц различного размера, формы, фазового состояния (лед, снег, вода) и различной ориентации. Каждая частица атмосферного образования создает отраженный сигнал, определяемый следующими зависимостями:

$$E_{omp_i}(t) = E_{omp_i} \cos\left[\omega_0(t + t_{з_i}) + \varphi_i\right] \quad \text{при} \quad -\frac{\tau_u}{2} \leq t \leq \frac{\tau_u}{2} \quad (3)$$

$$E_{omp_i}(t) = 0, \quad \text{если} \quad |t| > \frac{\tau_u}{2}, \quad (4)$$

где  $E_{omp_i}$  - амплитуда отраженного сигнала от  $i$ -той частицы атмосферного образования;

$t_{z_i} = \frac{2R_i}{c}$  - время запаздывания принимаемого антенной судовой РЛС

сигнала по отношению к излучаемому,  $R_i$  - расстояние от судовой РЛС до  $i$ -той отражающей частицы, а  $c$  - скорость распространения радиосигнала;

$\varphi_i$  - начальная фаза принимаемого сигнала.

Частицы в атмосферном образовании находятся в состоянии непрерывного хаотического движения под действием силы тяжести, ветровых потоков и конвективных движений, которые меняют их взаимное расположение и ориентацию. Происходит хаотическое изменение  $E_{omp_i}(t) = E_i, t_{z_i}$  и  $\varphi_i$ . В соответствии с этим, эхо-сигнал атмосферного образования представляет собой хаотически меняющееся электромагнитное колебание, для определения которого можно использовать корреляционную функцию. К флуктуирующим объектам относятся морская и земная поверхности, эхо-сигналы которых также непрерывно флуктуируют, изменяясь по форме, величине и длительности, ухудшая наблюдаемость навигационных объектов. Флуктуирующие объекты, независимо от их размеров, состоят из большого числа элементов, близких по материалу, форме, размерам и др., сосредоточенных на определенных расстояниях на поверхности.

Судовая РЛС наблюдает навигационные объекты в общем случае на фоне атмосферных образований, флуктуирующих объектов и шумов приемного устройства. Определим корреляционную функцию радиолокационных эхо-сигналов от атмосферных образований с учетом того, что судовая РЛС установлена на движущемся судне. Тогда корреляционная функция радиолокационных эхо-сигналов, отраженных от атмосферных образований, зависит не только от  $\tau$ , но и от времени  $t$ , что указывает на нестационарность процесса, т.е.

$$R(\tau) = \frac{N}{2} \cos \omega \tau \cos \overline{\Delta_r \alpha} + \frac{N}{2} \cos \omega(2t + \tau) \cos(\overline{\alpha - \alpha'}) + \\ + \frac{N^2 - N}{2} [\cos \omega t + \cos \omega(2t + \tau)] \cos \overline{\alpha} \cos \overline{\alpha'}, \quad (5)$$

где  $N$  - общее число отражателей в радиолокационном объеме;

$\Delta_r \alpha, \alpha, \alpha', \alpha - \alpha'$  - плотности распределения вероятностей величин.

На основании закона относительного движения, частицы атмосферного образования хаотически перемещаются друг относительно друга и все вместе относительно судовой РЛС с общей для всех скоростью. Это приводит к частично корреляционному движению отражателей атмосферного образования относительно судовой РЛС. Скорость перемещения атмосферного образования

$V_{ao}$  и мелкомасштабные скорости отдельных его частиц  $V_i$  будут стационарными случайными процессами. При этом движения отдельных отражателей относительно судовой РЛС будут частично коррелированными, тогда:

$$\overline{(V + V_i)} = \overline{V_i^2} \neq 0. \quad (6)$$

Суммарный набег фазы  $\Delta_\tau \alpha_i$  эхо-сигнала при этом определяется из условия:

$$\Delta_\tau \alpha_i = \Delta_\tau \beta_i + \Delta_\tau \gamma_i, \quad (7)$$

где  $\Delta_\tau \beta_i$  - составляющая набега фазы, обусловленная общим движением атмосферного образования;

$\Delta_\tau \gamma_i$  - составляющая набега фазы, обусловленная мелкомасштабным движением отдельных отражателей.

Разность фаз колебаний, приходящих от двух отражающих частиц атмосферного образования равна:

$$\Delta_\tau \varphi_{ij} = \Delta_\tau \gamma_i - \Delta_\tau \gamma_j. \quad (8)$$

Откуда:

$$\cos \overline{\Delta_\tau \varphi_{ij}} = (\cos \Delta_\tau \gamma)^2. \quad (9)$$

С учетом (8) значение корреляционной функции запишется в виде:

$$R(\tau) = N(N-1) \overline{(\cos \Delta_\tau \gamma)^2}. \quad (10)$$

При большом количестве частиц  $N$  в атмосферном образовании уравнение (10) примет вид:

$$R(\tau) = N^2 \overline{(\cos \Delta_\tau \gamma)^2}. \quad (11)$$

Из уравнения (11) следует, что статистические свойства эхо-сигналов атмосферных образований определяются только движением частиц относительно друг друга и не зависят от атмосферного образования. Если на пути судна имеются флуктуирующие объекты (морская и земная поверхность) и атмосферные образования, то выражение для корреляционной функции эхо-сигналов флуктуирующих объектов на выходе приемника судовой РЛС с линейным детектором запишется в виде:

$$R_{\phi o}(\tau) = c^2 \frac{\alpha_s \sigma_c}{8\pi} e^{-a|\tau|} \cos \beta \tau, \quad (12)$$

а на выходе приемника судовой РЛС с квадратичным детектором запишется в виде:

$$R_{\phi o}(\tau) = c^2 \alpha_k^2 \sigma_c^4 e^{-a|\tau|} \cos \beta \tau, \quad (13)$$

где  $c$  - коэффициент пропорциональности;

$\alpha_{\lambda}, \alpha_{\kappa}$  - параметри, определяющие крутизну характеристик линейного и квадратичного детекторов;

$a$  - постоянный коэффициент, зависящий от полосы пропускания приемника;

$\tau$  - интервал времени между двумя значениями эхо-сигнала;

$\sigma_c$  - среднеквадратическое отклонение значений принимаемого сигнала от среднего значения;

$\beta$  - фаза сигнала.

При наблюдении флуктуирующих объектов на фоне атмосферных образований, флуктуации эхо-сигналов флуктуирующих объектов и атмосферных образований, а также шумы приемника судовой РЛС можно считать статистически независимыми. При этом суммарная дисперсия эхо-сигналов флуктуирующих объектов, наблюдаемых на фоне атмосферных образований, с учетом шумов приемника имеет вид:

$$\sigma_{(\phi o+a o+u n)}^2 = \sigma_{\phi o}^2 + \sigma_{a o}^2 + \sigma_{u n}^2, \quad (14)$$

а нормированная корреляционная функция определяется из условия:

$$\rho_{(\phi o+a o+u n)}(\tau) = \frac{R_{\phi o}(\tau) + R_{a o}(\tau) + R_{u n}(\tau)}{\sigma_{\phi o}^2 + \sigma_{a o}^2 + \sigma_{u n}^2}. \quad (15)$$

С учетом корреляционной функции атмосферных образований на выходе линейного детектора приемника судовой РЛС, фильтрующих свойств его нагрузки  $R_{a o.l}(\tau)$ :

$$R_{a o.l}(\tau) = \sigma_{a o.l}^2 e^{-\epsilon|\tau|} \quad (16)$$

а также уравнения (12) и после их подстановки в (15) получим нормированную корреляционную функцию флуктуирующего объекта, атмосферного образования и шумов приемника в виде:

$$\rho_{(\phi o+a o+u n)}(\tau) = \frac{1}{\sigma_{\phi o}^2 + \sigma_{a o}^2 + \sigma_{u n}^2} \left( \sigma_{\phi o}^2 e^{-\frac{a}{2}|\tau|} \sqrt{\cos \beta \tau} + \sigma_{a o}^2 e^{-\frac{6}{2}|\tau|} + \sigma_{u n}^2 e^{-\frac{\gamma}{2}\tau^2} \right) \cos \omega \tau. \quad (17)$$

После прохождения смеси сигналов с нормированной корреляционной функцией (17) через линейный детектор приемника судовой РЛС на его выходе будет иметь место сигнал со следующей корреляционной функцией:

$$\begin{aligned} R_{(\phi o+a o+u n)}(\tau) = & \frac{\alpha_{\lambda}}{4\sigma^2} \left( \sigma_{\phi o}^2 e^{-\frac{a}{2}|\tau|} \sqrt{\cos \beta \tau} + \sigma_{a o}^2 e^{-\frac{6}{2}|\tau|} + \sigma_{u n}^2 e^{-\frac{\gamma}{2}\tau^2} \right) \cos \omega \tau + \frac{\alpha_{\kappa}^2}{8\pi\sigma^2} \times \\ & \times \left( 2\sigma_{a o}^2 \sigma_{u n}^2 e^{-\frac{a}{2}|\tau|} e^{-\frac{\gamma}{2}\tau^2} \sqrt{\cos \beta \tau} + 2\sigma_{\phi o}^2 \sigma_{a o}^2 e^{-\frac{a+6}{2}|\tau|} \sqrt{\cos \beta \tau} + 2\sigma_{a o}^2 \sigma_{u n}^2 e^{-\frac{6}{2}|\tau|} e^{-\frac{\gamma}{2}\tau^2} + \sigma_{\phi o}^4 e^{-a|\tau|} \cos \beta \tau + \right. \\ & \left. + \sigma_{u n}^4 e^{-\gamma\tau^2} + \sigma_{a o}^4 e^{-\epsilon|\tau|} \right) (1 + \cos 2\omega \tau). \end{aligned} \quad (18)$$

С учетом фильтрующих свойств нагрузки детектора и при условии, что  $\gamma \gg a$  и  $\gamma \gg b$  из (17) следует выражение для корреляционной функции эхо-сигналов флуктуирующих объектов, наблюдаемых на фоне атмосферных образований на выходе видеоусилителя приемника судовой РЛС с линейным детектором с учетом его шумов, в виде:

$$R_{(\phi_0+a_0+u_n)_l}(\tau) = \frac{c\alpha_l^2}{8\pi(\sigma_{\phi_0}^2 + \sigma_{a_0}^2 + \sigma_{u_n}^2)} \times \left[ 2\sigma_{u_n}^2(\sigma_{\phi_0}^2 + \sigma_{a_0}^2)e^{-\frac{\gamma}{2}\tau^2} + 2\sigma_{\phi_0}^2\sigma_{a_0}^2e^{-\frac{a+b}{2}|\tau|}\sqrt{\cos\beta\tau} + \sigma_{\phi_0}^4e^{-a|\tau|}\cos\beta\tau + \sigma_{u_n}^4e^{-\gamma\tau^2} + \sigma_{a_0}^4e^{-b|\tau|} \right] \quad (19)$$

В случае приемника судовой РЛС с квадратичным детектором выражении для корреляционной функции эхо-сигналов флуктуирующих объектов, наблюдаемых судовой РЛС на фоне атмосферных образований на выходе приемника с учетом его собственных шумов и с учетом корреляционной функции тока при квадратичном детектировании:

$$R'(\tau) = 2\alpha_k\sigma^4\rho^2(\tau) \quad (20)$$

формула (17) запишется в виде:

$$R_{(\phi_0+a_0+u_n)}(\tau) = c^2\alpha_l^2 \times \left[ 2\sigma_{u_n}^2(\sigma_{\phi_0}^2 + \sigma_{a_0}^2)e^{-\frac{\gamma}{2}\tau^2} + 2\sigma_{\phi_0}^2\sigma_{a_0}^2e^{-\frac{a+b}{2}|\tau|}\sqrt{\cos\beta\tau} + \sigma_{\phi_0}^4e^{-a|\tau|}\cos\beta\tau + \sigma_{u_n}^4e^{-\gamma\tau^2} + \sigma_{a_0}^4e^{-b|\tau|} \right]. \quad (21)$$

Выражение корреляционной функции, представленной в (21) характеризует собой наиболее общий случай, из которого могут быть получены соотношения для более простых частных случаев.

При наблюдении судовой РЛС навигационного объекта вне зоны атмосферных образований, выражение для корреляционной функции эхо-сигналов на выходе приемника с линейным детектором с учетом его собственных шумов получится из (19) при  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 0$  и  $\sigma_{a_0}^2 = 0$ , т. е.

$$R_{(u_n+u_n)_l}(\tau) = \frac{c^2\alpha_l\sigma_{no}^2\sigma_{u_n}^2}{8\pi(\sigma_{no}^2 + \sigma_{u_n}^2)} \left( e^{-\gamma\tau^2} + 2\frac{\sigma_{no}^2}{\sigma_{u_n}^2}e^{-\frac{\gamma}{2}\tau^2} + \frac{\sigma_{no}^4}{\sigma_{u_n}^4} \right), \quad (22)$$

где  $\sigma_{no}^2$  - эффективное значение немодулированного сигнала.

Разлагая отношение

$$\frac{\sigma_{u_n}^2}{\sigma_{no}^2 + \sigma_{u_n}^2} = \left( 1 + \frac{\sigma_{no}^2}{\sigma_{u_n}^2} \right) \quad (23)$$

в степенной ряд и ограничивая разложение двумя первыми членами, получаем:

$$R_{(u_n+u_n)_l}(\tau) = \frac{c^2\alpha_l^2\sigma_{u_n}^2}{8\pi} \left[ \left( 1 + \frac{\sigma_{no}^2}{\sigma_{u_n}^2} \right) e^{-\gamma\tau^2} + 2\frac{\sigma_{no}^2}{\sigma_{u_n}^2} e^{-\frac{\gamma}{2}\tau^2} \right]. \quad (24)$$

Аналогічним образом может быть получено выражение для корреляционной функции эхо-сигналов навигационного объекта, наблюдаемого вне зоны атмосферного образования, на выходе приемника судовой РЛС с квадратичным детектором с учетом его шумов.

При наблюдении судовой РЛС навигационного объекта на фоне атмосферных образований выражение для корреляционной функции эхо-сигналов с учетом шумов приемного устройства судовой РЛС, имеющего линейный детектор получается из (19) при  $\alpha = 0$  и  $\beta = 0$ , т.е.

$$R_{(но+ао+шн)л}(\tau) = \frac{c\alpha_l^2}{8\pi(\sigma_{но}^2 + \sigma_{ао}^2 + \sigma_{шн}^2)} \times \left[ 2\sigma_{шн}^2(\sigma_{но}^2 + \sigma_{ао}^2)e^{-\frac{\gamma}{2}\tau^2} + 2\sigma_{но}^2\sigma_{ао}^2e^{-\frac{\delta}{2}|\tau|} + \sigma_{но}^4 + \sigma_{шн}^4e^{-\gamma\tau^2} + \sigma_{ао}^4e^{-\delta|\tau|} \right] \quad (25)$$

где  $\sigma_{но}^2$  - эффективное значение немодулированного сигнала.

При использовании приемника с квадратичным детектором, соответствующее выражение для корреляционной функции получается из (22), т.е.

$$R_{(но+ао+шн)к}(\tau) = c^2\alpha_k^2 \left[ 2\sigma_{шн}^2(\sigma_{но}^2 + \sigma_{ао}^2)e^{-\frac{\gamma}{2}\tau^2} + 2\sigma_{но}^2\sigma_{ао}^2e^{-\frac{\delta}{2}|\tau|} + \sigma_{но}^4 + \sigma_{шн}^4e^{-\gamma\tau^2} + \sigma_{ао}^4e^{-\delta|\tau|} \right]. \quad (26)$$

### Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

1 Рассмотрена корреляционная функция радиолокационных сигналов, отраженных от атмосферных образований, морской и земной поверхности и шумов приемного устройства.

2 Установлено, что при радиолокационном наблюдении судовой РЛС атмосферных флуктуирующих объектов (морской и земной поверхности) на фоне атмосферных образований, флуктуации эхо-сигналов, отраженных от флуктуирующих объектов, атмосферных образований, а также шумы приемного устройства являются статистически независимыми.

3 Получена корреляционная функция радиолокационных сигналов, отраженных от морской и земной поверхности, при наличии в зоне радиолокационного наблюдения судовой РЛС атмосферных образований, на выходе видеосуилителя приемника с линейным и квадратичным детектором.

4 Получена корреляционная функция эхо-сигналов навигационных объектов, наблюдаемых судовой РЛС вне зоны атмосферных образований на выходе приемника с линейным детектором и с учетом его собственных шумов.

5 Получена корреляционная функция эхо-сигналов навигационных объектов, наблюдаемых судовой РЛС на фоне атмосферных образований с учетом шумов приемного устройства с линейным и квадратичным детектором.



6 Обоснована статистическая связь между значениями эхо-сигнала, отделенными интервалом времени « $\tau$ », в пределах которого наблюдается связь между случайными значениями эхо-сигнала.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Билетов М.В. Радиометеорология. / М.В. Билетов, В. П. Кузьменко, Н. Ф. Павлов, Н. В. Цивенко. – М.: Военное издательство, 1984. - 208 с.
2. Павлов Н.Ф. Аэрология, радиометеорология и техника безопасности / Н.Ф. Павлов. - Л.: Гидрометеоздат, 1960. - 431 с.
3. Канарейкин Д.Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д.Б. Канарейкин, Н.Ф. Павлов, В.А. Потехин. - М.: Советское радио, 1966. – 440с.