

УДК 623.624.2

Вплив опадів на роботу суднової радіолокаційної системи при спостереженні за навігаційними об'єктами

Ревенко В. Ю.

Національний Університет "Одеська морська академія", м. Одеса, Україна

E-mail: vitaliy.miami@gmail.com

Вплив опадів на роботу суднової радіолокаційної системи (РЛС) проявляється у вигляді ослаблення потужності електромагнітної хвилі і погіршення радіолокаційного спостереження за навігаційними об'єктами, які перебувають або в зоні опадів, або за їх зоною. Наявність опадів по трасі поширення електромагнітної хвилі призводить до зменшення дальності і ймовірності виявлення навігаційних об'єктів судновою РЛС. При опроміненні електромагнітною хвилею частинок опадів частина енергії перетворюється в тепло та розсіюється по різних напрямках, а частина відбитої енергії розповсюджується в напрямку антени суднової РЛС і створює на індикаторах помилкові сигнали про навігаційні об'єкти. У роботі представлені результати моделювання загасання потужності хвилі і отримання енергетичних характеристик матриці втрат усередині атмосферного об'єкта, за якими встановлюються його фізичні властивості, необхідні для радіолокаційного прогнозу зменшення дальності виявлення навігаційного об'єкта. Показано, що радіофізичну інформацію про об'єкт спостереження судновою РЛС можна отримати за значеннями матриці втрат потужності електромагнітної хвилі усередині об'єкта, елементи якої є енергетичними характеристиками луна-сигналу електромагнітної хвилі. Встановлено, що коефіцієнти матриці втрат луна-сигналу визначаються інтенсивністю опадів і кутами поляризації усередині радіолокаційного об'єкта. За результатами розрахунків показано, що найбільші втрати потужності електромагнітної хвилі спостерігаються при формі частинок у вигляді сплюснутих еліпсоїдів, що характерно для злив. Встановлено, що витягнуті частки також впливають на втрату потужності випромінюваної антеною суднової РЛС електромагнітної хвилі, а сферична форма частинок, що характерно для туману, не впливає на втрату потужності сигналу. Отримані результати мають наукову і практичну цінність і можуть бути використані для оцінки втрат потужності луна-сигналів в залежності від інтенсивності опадів при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів судновою РЛС на шляху судна.

Ключові слова: радіолокаційна система; метеорологічні явища; плоска електромагнітна хвиля; поглинання і розсіяння електромагнітної енергії

DOI: [10.20535/RADAP.2020.83.47-54](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.83.47-54)

Вступ

На сьогоднішній день основними засобами для безпечного судноводіння і виявлення об'єктів при різних погодних умовах залишаються радіолокаційні системи (РЛС) і системи супутникової навігації. Точна інформація про об'єкт виявлення РЛС залежить від процесу поширення електромагнітної хвилі в атмосфері. Як правило, радіолокаційний сигнал несе в собі інформацію про об'єкт і середовище, в якому поширюється електромагнітна енергія, з урахуванням її коефіцієнта заломлення, магнітної проникності і питомої електричної провідності [1].

Різні метеорологічні явища також є радіолокаційними об'єктами, які виявляються судновою РЛС. Електромагнітна хвиля, що випромінюється систем-

ною судновою РЛС при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів, що знаходяться за зоною опадів або в їх зоні, взаємодіє з ними. В результаті такої взаємодії відбувається втрата потужності хвилі, що призводить до зменшення дальності виявлення навігаційних об'єктів на шляху судна, зниження детального аналізу радіолокаційної інформації про об'єкт [2]. Елементи матриці втрат залежать від форми, електричних та інших властивостей як атмосферного явища, так і навігаційного об'єкта. Використання поляризаційної інформації луна-сигналу на двох довжинах хвиль в суднової РЛС дозволяє отримати втрати потужності луна-сигналу, за якими встановлюється фізичний зміст коефіцієнтів матриці втрат [3].

Проблема розрахунку відбивних характеристик полідисперсного середовища, що складається з частинок різних видів опадів, за даними радіолокаційного сигналу розглядалася в багатьох роботах [4–10] з використанням різних методик. Для моделювання процесу загасання випромінюваних хвиль при дощі з різною інтенсивністю на частотах міліметрового діапазону використовувалися теорія розсіювання Мі, гамма-моделі і моделі розподілу Вейбула, які найкраще узгоджуються з даними вимірів, представленими в [5–7]. Ці результати показують те, що при відповідній ширині смуги частот, яка демонструє кращу збіжність між коефіцієнтами відбиття дощових крапель і загасанням, бортову РЛС можна використовувати для прогнозування опадів [8]. Результати математичного та комп'ютерного моделювання в роботі [9] демонструють, що між поляризаційними характеристиками радіолокаційного сигналу і атмосферними динамічними явищами існує взаємозв'язок, що може бути використано для оцінки розміру часток дощових опадів і їх інтенсивності. Однак для суднової РЛС, що працює зазвичай в сантиметровому діапазоні (X - і S -діапазони хвиль із середньою довжиною хвилі близько трьох і десяти сантиметрів, відповідно), вивчення впливу опадів на загасання потужності хвилі практично відсутнє в літературі.

Частинки опадів мають різну форму і орієнтацію в просторі, тому частина електромагнітної енергії, що опромінює хвилі поглинається частинками і перетворюється в тепло, а частина розсіюється по різних напрямках, які не завжди збігаються з напрямком на навігаційний об'єкт або в напрямку на антену суднової РЛС при відбитті електромагнітної хвилі від навігаційного об'єкта. Частина відбитої енергії від дощових частинок розповсюджується в напрямку антени суднової РЛС і створює на індикаторах помилкові сигнали про навігаційні об'єкти. Наявність опадів по трасі поширення електромагнітної хвилі призводить до зменшення дальності і ймовірності виявлення навігаційних об'єктів суднової РЛС. Виникає необхідність врахування впливу опадів на роботу суднової РЛС.

Метою цієї роботи є обґрунтування можливості отримання енергетичних характеристик матриці втрат усередині атмосферного об'єкта, за якими встановлюються його фізичні властивості необхідні для радіолокаційного прогнозу зменшення дальності виявлення навігаційного об'єкта.

1 Моделювання загасання потужності електромагнітної хвилі всередині радіолокаційного об'єму опадів

Плоска електромагнітна хвиля, що випромінюється антенною суднової РЛС, при проходженні через зону опадів уздовж осі z , що характеризуються двома комплексними коефіцієнтами заломлення \hat{n}_x і \hat{n}_y уздовж осей декартової системи координат, взаємодіє всередині об'єму опадів з їх частками [11]. Ортогональні компоненти електричного вектора хвилі в декартовому базисі представлені на рис. 1 і мають наступний вигляд:

$$\begin{aligned} E_x &= E_{xm} e^{-ik\hat{n}_x}; \\ E_y &= E_{ym} e^{-ik\hat{n}_y}, \end{aligned} \quad (1)$$

де k – хвильовий вектор.

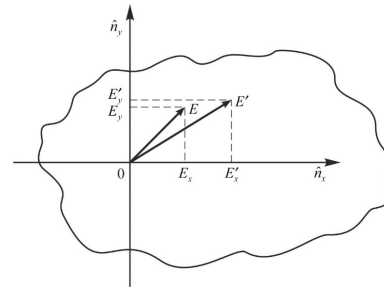


Рис. 1. Взаємодія електричного вектора хвилі з об'ємом опадів

Величини E_x і E_y змінюються від 0 до E_{xm} і E_{ym} . Компоненти електричної хвилі E всередині зони опадів зазнають комплексну затримку, виражену у зміні компонент вектора E_x і E_y на $E_{xm} e^{-ik\hat{n}_x}$, $E_{ym} e^{-ik\hat{n}_y}$ і утворенні вектора E' .

У загальному випадку електричне поле хвилі всередині об'єму опадів в довільній точці матиме всі три складові $E_x(t)$, $E_y(t)$, $E_z(t)$, які можна представити електричним вектором $E_{bc}(r)$ і рис. 2:

$$E_{bc}(r) = \begin{pmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \\ E_z(t) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де r – радіус-вектор E_{bc} в довільній точці об'єму.

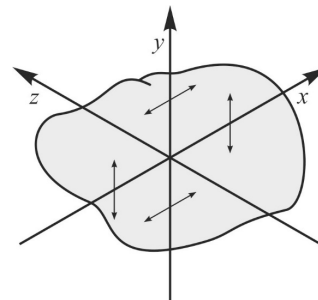


Рис. 2. Векторний вплив опромінюючої хвилі в трьох перетинах всередині атмосферного явища на діелектричні частинки ($\epsilon_{об} = 3$ і $\epsilon_{мп} = 81$)

Для всіх трьох перетинів ізотропного атмосферного середовища (обложні і мрячні опади) в початковому стані, якщо хвиля поширюється вздовж осі z , тензор діелектричної проникності в перетинах $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$ записується у вигляді суми симетричної і несиметричної частин:

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_i & 0 \\ 0 & \varepsilon_j \end{vmatrix} = \frac{\hat{\varepsilon}_i + \hat{\varepsilon}_j}{2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} + \frac{\hat{\varepsilon}_i - \hat{\varepsilon}_j}{2} \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}, \quad (3)$$

$i, j = x, y, z, \quad i \neq j.$

Зі збільшенням інтенсивності опадів по трасі руху судна, їх частки набувають еліптичної форми і розсіювання електричного поля падаючої хвилі відбувається по трьох осях частки з діелектричними проникностями $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$, які взаємодіють з електричним полем хвилі у вигляді трьох рівнянь:

$$\begin{aligned} \hat{\varepsilon}_x - \hat{\varepsilon}_0 &= f_l (P_1 - P_2) + f_s (P_1 + P_2); \\ \hat{\varepsilon}_y - \hat{\varepsilon}_0 &= -f_l (P_1 - P_2) + f_s (P_1 + P_2); \\ \hat{\varepsilon}_z - \hat{\varepsilon}_0 &= -f_l (P_1 + P_2) + f_s (P_1 + P_2), \end{aligned} \quad (4)$$

де f_l – функція векторної реакції еліптичних частинок опадів на вплив електромагнітної хвилі лінійної поляризації; f_s – функція скалярної реакції, що обумовила розсіювання енергії хвилі на частинках атмосферного явища; ε_0 – вихідна діелектрична проникність опромінюваного об'єму атмосферного явища представлена залежністю:

$$\hat{\varepsilon}_0 = \begin{vmatrix} \hat{\varepsilon}_{0xx} & \hat{\varepsilon}_{0xy} & \hat{\varepsilon}_{0xz} \\ \hat{\varepsilon}_{0yx} & \hat{\varepsilon}_{0yy} & \hat{\varepsilon}_{0yz} \\ \hat{\varepsilon}_{0zx} & \hat{\varepsilon}_{0zy} & \hat{\varepsilon}_{0zz} \end{vmatrix}. \quad (5)$$

Електричний вектор випромінюваної хвилі, що падає на відбивний об'єм атмосферного явища, представлений у вигляді матриці [12]:

$$E_{\text{вип}} = \begin{vmatrix} E_{x \text{ вип}}(t) \\ E_{y \text{ вип}}(t) \\ E_z = 0 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Втрати потужності [П] луна-сигналу об'єкта визначаються через матрицю втрат і матрицю відбитої від атмосферного явища (відбивного об'єму) електромагнітної хвилі за наступною формулою:

$$[\text{П}] = \begin{bmatrix} E_{x \text{ від}} \\ E_{y \text{ від}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{x \text{ від}} \\ E_{y \text{ від}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

При спостереженні об'єкта під довільним кутом Θ коефіцієнти матриці втрат $m_{12} = m_{21} = 0$ і матриця стає діагональною. З урахуванням рівнянь (2) і (5) буде доречним також матричне рівняння для поля всередині атмосферного об'єкта:

$$E_{\text{вн}}(r) = |\gamma(r)| E_{\text{изл}}, \quad (8)$$

де $\gamma(r)$ – матриця, що характеризує поле електромагнітної хвилі всередині об'єму опадів:

$$|\gamma(r)| = \begin{vmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Коефіцієнти матриці γ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) залежать від форми, орієнтації, діелектричних властивостей частинок опадів і кута падіння плоскої електромагнітної хвилі.

Мірою поглинання і розсіювання електромагнітної енергії, що падає на радіолокаційний об'єм V опадів, є ефективні площі поглинання $\sigma(r)_{\text{погл}}$ і ефективні площі розсіювання $\sigma(r)_{\text{роз}}$ [13]. Втрати електромагнітної енергії (потужності) електромагнітної хвилі, випромінюваної антеною суднової РЛС, при її проходженні повз зону опадів усередині радіолокаційного об'єму знаходяться підсумовуванням електричного поля:

$$\begin{aligned} P_{\text{П}} &= \int (\sigma_{\Sigma}(r) E_{\text{вс}}^2) dv = \\ &= \int [\sigma_{\Sigma}(r) (\sum E_{x \text{ вс}}^2 + E_{y \text{ вс}}^2 + E_{z \text{ вс}}^2)] dv = \\ &= \int [\sigma_{\Sigma}(r) (\sum P_{x \text{ вс}} + P_{y \text{ вс}} + P_{z \text{ вс}})] dv, \end{aligned} \quad (10)$$

де $\sigma_{\Sigma}(r) = \sigma_{\Sigma}(r)_{\text{погл}} + \sigma_{\Sigma}(r)_{\text{роз}}$.

Позначимо втрати потужності всередині об'єму опадів $P_{\text{I в с}}$ і $P_{\text{II в с}}$. Втрати потужності в об'ємі дощу визначаються в напрямку x і y , отримуємо:

$$\begin{aligned} P_{\text{I в с}} &= (\sigma_{11\Sigma}(r)_{\text{погл}} + \sigma_{11\Sigma}(r)_{\text{роз}}) E_{x \text{ пад}} + \\ &+ (\sigma_{12\Sigma}(r)_{\text{погл}} + \sigma_{12\Sigma}(r)_{\text{роз}}) E_{y \text{ пад}}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{II в с}} &= (\sigma_{21\Sigma}(r)_{\text{погл}} + \sigma_{21\Sigma}(r)_{\text{роз}}) E_{x \text{ пад}} + \\ &+ (\sigma_{22\Sigma}(r)_{\text{погл}} + \sigma_{22\Sigma}(r)_{\text{роз}}) E_{y \text{ пад}}. \end{aligned} \quad (12)$$

Коефіцієнти матриці $\sigma_{\text{вт}}(r)_{\text{погл}}$ і $\sigma_{\text{вт}}(r)_{\text{роз}}$ визначаються через питомі коефіцієнти поглинання $\gamma_{\text{погл}}$ і $\gamma_{\text{роз}}$ наступними залежностями [14]:

$$\gamma_{\text{погл}}(r)_{\Sigma} = 4,34 \cdot 10^3 N \sigma_{\text{погл}}(r)_{\Sigma}; \quad (13)$$

$$\gamma_{\text{роз}}(r)_{\Sigma} = 4,34 \cdot 10^3 N \sigma_{\text{роз}}(r)_{\Sigma}, \quad (14)$$

де N – число часток в 1 м^3 радіолокаційного об'єму дощу.

Сумарний коефіцієнт ослаблення електромагнітної енергії всередині радіолокаційного об'єму опадів визначається з умови:

$$\begin{aligned} \gamma_{\Sigma \text{ погл} + \text{роз}}(r) &= 4,34 \cdot 10^3 N (\sigma_{\text{погл}}(r)_{\Sigma} + \sigma_{\text{роз}}(r)_{\Sigma}) = \\ &= 4,34 \cdot 10^3 N \sigma_{\text{погл} + \text{роз}}(r). \end{aligned} \quad (15)$$

Для типових законів розподілу крапель в дощі різної інтенсивності на шляху судна питомий коефіцієнт ослаблення потужності хвилі (дБ/км) всередині радіолокаційного об'єму опадів визначається за допомогою наступної залежності:

$$\gamma_{\Sigma \text{ погл} + \text{роз}}(r) = \beta I^{\alpha}, \quad (16)$$

де I – інтенсивність опадів, мм/год; α і β – коефіцієнти, значення яких при температурі дощу 18°C для довжин хвиль $\lambda_1 = 3$ см і $\lambda_2 = 10$ см, на яких працюють суднові РЛС, відповідно рівні: $\alpha = 1,31$, $\beta = 0,007$ і $\alpha = 1,0$, $\beta = 0,0003$ [2].

Враховуючи (15) втрати потужності в об'ємі дощу можуть бути виражені як:

$$P_{I\text{вс}} = \gamma_{\Sigma\text{ погл+роз}}(r)_{11} E_{x\text{ пад}} + \gamma_{\Sigma\text{ погл+роз}}(r)_{12} E_{y\text{ пад}}; \quad (17)$$

$$P_{II\text{вс}} = \gamma_{\Sigma\text{ погл+роз}}(r)_{21} E_{x\text{ пад}} + \gamma_{\Sigma\text{ погл+роз}}(r)_{22} E_{y\text{ пад}}. \quad (18)$$

Приймаючи $E_{x\text{ пад}}$ і $E_{y\text{ пад}}$ рівними 1, для кожної інтенсивності опадів визначаються сумарні коефіцієнти ослаблення в опадах в напрямку на РЛС, за значеннями яких знаходяться складові втрати випромінюваної потужності всередині радіолокаційного об'єму при її відбитті від частинок опадів різної інтенсивності в напрямку на суднову РЛС, з урахуванням (16), $P_{I\text{вс}}$, $P_{II\text{вс}}$ визначаються з умови:

$$\begin{aligned} P_{I\text{вс}} &= [\beta I_n^\alpha]_{11} + [\beta I_n^\alpha]_{12}; \\ P_{II\text{вс}} &= [\beta I_n^\alpha]_{21} + [\beta I_n^\alpha]_{22}, \end{aligned} \quad (19)$$

де $[\beta I_n^\alpha]_{11} - P_{I\text{вс}}$ при опроміненні об'єму опадів хвилею горизонтальної поляризації і прийомі луна-сигналу горизонтальної поляризації; $[\beta I_n^\alpha]_{12} - P_{I\text{вс}}$ при опроміненні об'єму опадів хвилею горизонтальної поляризації і прийомі луна-сигналу вертикальної поляризації; $[\beta I_n^\alpha]_{21} - P_{II\text{вс}}$ при опроміненні об'єму опадів хвилею вертикальної поляризації і прийомі луна-сигналу горизонтальної поляризації; $[\beta I_n^\alpha]_{22} - P_{II\text{вс}}$ при опроміненні об'єму опадів хвилею вертикальної поляризації і прийомі луна-сигналу вертикальної поляризації; n – номер опадів певної інтенсивності.

Тоді з урахуванням (19) сумарна втрата випромінюваної потужності всередині об'єму опадів визначається з умови:

$$\begin{aligned} P_{\Sigma\text{вс}} &= P_{I\text{вс}} + P_{II\text{вс}} \\ &= [\beta I_n^\alpha]_{11} + [\beta I_n^\alpha]_{12} + [\beta I_n^\alpha]_{21} + [\beta I_n^\alpha]_{22}. \end{aligned} \quad (20)$$

Опади на шляху судна складаються з водяних крапель з діелектричною проникністю $\varepsilon = 81$, з крижаних кристалів або сніжинок з діелектричною проникністю $\varepsilon = 3$, а також можуть випадати в змішаному стані (град з водяними краплями). Дія мікрофізичних і динамічних процесів в хмарах призводить до зміни форми, розмірів, орієнтації і числа частинок опадів в радіолокаційному об'ємі. Тому при опроміненні зони опадів електромагнітною хвилею лінійної поляризації луна-сигнал, що надходить на вхід антени суднової РЛС, формується як сумарний та складається з луна-сигналів від кожної частки опадів. У загальному випадку форма частинок зливових опадів змінюється від сферичної до

еліптичної, а орієнтація частинок еліптичної форми буде залежати від інтенсивності опадів. При розгляді втрат випромінюваної потужності в зливових опадах скористаємося фактором форми ρ частинок, наведеним в [15], а осі еліпсоїдних частинок опадів позначимо через a , b і c . Тоді для витягнутого двохосового еліпсоїда ($a = b < c$) фактор форми $\rho = \frac{b}{c} < 1$, а для сплюсненого еліпсоїда ($a = b > c$) фактор форми $\rho > 1$. Якщо частинки опадів мають сферичну форму, то $\rho = 1$, $a = b = c$ (рис. 3).

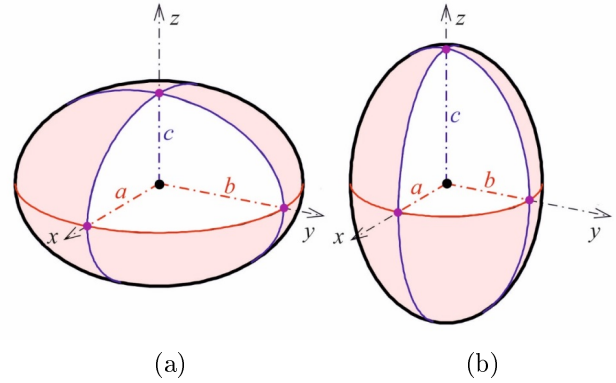


Рис. 3. Частка опадів у вигляді сплюсненого (а) і витягнутого (б) еліпсоїда

Втрати енергії всередині еліпсоїдної частки в формі сплюсненого, витягнутого еліпсоїдів, відносно втрат енергії всередині сферичної частинки, розраховуються з урахуванням дипольних моментів, що наводяться падаючою на частку електромагнітною хвилею лінійної поляризації у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} E_{x\text{ пад}} &= \cos \beta e^{I\omega t}; \\ E_{y\text{ пад}} &= \sin \beta e^{I\omega t}; \\ E_{z\text{ пад}} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (21)$$

і фактора форми еліпсоїдних частинок опадів за такими залежностями:

$$P_{I\text{вс}} = \left[\left(\frac{q_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} - \frac{q'_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} \right) \alpha_1 (\alpha_2 \sin \beta + \alpha_1 \cos \beta) + \frac{q'_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} \cos \beta \right]^2; \quad (22)$$

$$P_{II\text{вс}} = \left[\left(\frac{q_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} - \frac{q'_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} \right) \alpha_2 (\alpha_2 \sin \beta + \alpha_1 \cos \beta) + \frac{q'_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} \sin \beta \right]^2, \quad (23)$$

де

$$\begin{aligned} q_{\text{ел}} &= \frac{abc}{3} \frac{\varepsilon - 1}{(\varepsilon - 1)n}; \\ q'_{\text{ел}} &= \frac{abc}{3} \frac{\varepsilon - 1}{1 + (\varepsilon - 1)n'}; \\ q &= q' = q_{\text{сф}} = a^3 \frac{\varepsilon - 1}{\sigma + 2}. \end{aligned}$$

Виразимо n і n' через фактор форми ρ , тоді:

$$n = \frac{\rho^2}{\sqrt{(1 - \rho^2)^3}} \left(\ln \frac{1 + \sqrt{1 - \rho^2}}{1 - \sqrt{1 - \rho^2}} - 2\sqrt{1 - \rho^2} \right)$$

– для витягнутого еліпсоїда;

$$n' = \frac{\rho^2}{\sqrt{(1-\rho^2)^3}} \left(\rho^2 - 1 - \arctg \sqrt{\rho^2 - 1} \right)$$

– для сплюсненого еліпсоїда;

$$n_{\text{сф}} = \frac{1}{3}$$

– для сфери;

α_1 і α_2 – кути, що характеризують стан частинки в просторі відносно системи координат x, y, z ; β – кут площини поляризації випромінюваної антеною суднової РЛС електромагнітної хвилі лінійної поляризації; ε – діелектрична проникність речовини частки опадів.

Втрати енергії електромагнітної хвилі в радіолокаційному об'ємі опадів, в якому є $N(d_i)$ частинок еліпсоїдної або сферичної форми, визначаються з умови:

$$P_{\text{Ibc}} = \left[\left(\frac{q_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} - \frac{q'_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} \right) \alpha_1 (\alpha_2 \sin \beta + \alpha_1 \cos \beta) + \frac{q'_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} \cos \beta \right]^2 \cdot VN(d_i); \quad (24)$$

$$P_{\text{IIbc}} = \left[\left(\frac{q_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} - \frac{q'_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} \right) \alpha_2 (\alpha_2 \sin \beta + \alpha_1 \cos \beta) + \frac{q'_{\text{ел}}}{q_{\text{сф}}} \sin \beta \right]^2 \cdot VN(d_i), \quad (25)$$

де $V = \frac{\pi c \tau_{\text{н}}}{8} R^2 \Theta^2$ – радіолокаційний об'єм в зоні опадів, в якому міститься N частинок діаметром d_i , тобто $N(d_i)$; c – швидкість світла, м/сек; $\tau_{\text{н}}$ – тривалість випромінюваного імпульсу, мкс; R – відстань до зони опадів, км; Θ – ширина діаграми спрямованості антени суднової РЛС, рад.

Сумарна відносна втрата енергії хвилі всередині радіолокаційного об'єму, заповненого частинками несферичної форми і різного фазового стану, визначається залежністю:

$$P_{\Sigma \text{bc}} = P_{\text{Ibc}} + P_{\text{IIbc}}. \quad (26)$$

2 Результати та обговорення

Результати розрахунку втрат потужності електромагнітної хвилі всередині радіолокаційного об'єму опадів на шляху судна в залежності від їх інтенсивності (фактор форми ρ частинок) і кута поляризації представлені в табл. 1.

Аналіз даних табл. 1 показав, що найбільші втрати потужності електромагнітної хвилі спостерігаються при факторі форми частинок зливових опадів

$\rho=0,2$ (сплюснуті частки). Сферична форма ($\rho=1$) частинок (наприклад, туман) не впливає на втрату потужності випромінюваної антеною суднової РЛС електромагнітної хвилі. Витягнуті частки також впливають на втрату потужності електромагнітної хвилі ($\rho=1,1-2,1$). Таким чином, вплив атмосферних опадів на радіолокаційне спостереження навігаційних об'єктів обумовлений інтенсивністю опадів і кутом поляризації в радіолокаційному об'ємі. Це призводить до збільшення втрат потужності луна-сигналів від частинок опадів, при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів судновою РЛС на шляху судна.

Табл. 1 Залежність втрати потужності всередині радіолокаційного об'єму опадів від їх інтенсивності та кута поляризації

ρ	$P_{\text{I}}, P_{\text{II}}$		P_{Σ}
	$\Theta, ^\circ$		
	0	90	
0,2÷0,3	0,5093	25,6228	26,132
0,3÷0,4	0,5536	10,2786	10,826
0,4÷0,5	0,6042	5,4864	6,09
0,5÷0,6	0,6599	3,4547	4,115
0,6÷0,7	0,7202	2,4167	3,137
0,7÷0,8	0,7845	1,8163	2,601
0,8÷0,9	0,8527	1,4370	2,290
0,9÷1,0	0,9246	1,1813	2,106
1,0÷1,1	1,0000	1,0000	2,000
1,1÷1,2	1,1609	0,8663	2,027
1,2÷1,3	1,2463	0,7644	2,011
1,3÷1,4	1,3349	0,6847	1,931
1,4÷1,5	1,4266	0,6210	0,956
1,5÷1,6	1,5214	0,5692	2,091
1,6÷1,7	1,6192	0,5162	2,135
1,7÷1,8	1,7200	0,4002	2,211
1,8÷1,9	1,8238	0,4596	2,283
1,9÷2,0	1,9306	0,4334	2,364
2,0÷2,1	2,0402	0,3907	2,431

У порівнянні з обчислювальними методами загасання електромагнітної енергії на основі моделі розподілу крапель дощу Вейбула [16] і теорії розсіювання Мі [17] для міліметрового діапазону радіосигналу запропонована в цій роботі методика може бути застосована для оперативного прогнозу зменшення дальності виявлення радіолокації навігаційних об'єктів, що знаходяться в зоні або поза зоною зливових опадів. Отримані в роботі результати по дослідженню втрати потужності всередині атмосферного явища безпосередньо залежать від форми частинок опадів.

Висновки

Показано, що радіофізичну інформацію про вплив атмосферного явища на параметри електромагнітної хвилі, що проходить через атмосферне явище при радіолокаційному спостереженні судновою РЛС навігаційного об'єкта, можна отримати за значеннями матриці втрат потужності електромагнітної хвилі всередині атмосферного явища. Коефіцієнти даної матриці є енергетичними характеристиками втрат потужності луна-сигналу електромагнітної хвилі. Показано, що коефіцієнти матриці втрат луна-сигналу атмосферного явища визначаються фізичними властивостями частинок атмосферного явища всередині радіолокаційного об'єкта. Встановлено, що найбільша сумарна втрата енергії хвилі всередині радіолокаційного об'єкта спостерігається для сплюснутих частинок опадів з фактором форми 0,2, а найменша втрата – для витягнутих частинок з фактором форми 1,1. Показано, що сферична форма частинок не впливає на втрату потужності РЛС електромагнітної хвилі. Отримані результати мають наукову і практичну цінність і можуть бути використані для оцінки втрат потужності луна-сигналів в залежності від інтенсивності опадів при радіолокаційному спостереженні навігаційних об'єктів судновою РЛС на шляху судна.

Перелік посилань

1. Трофименко І. В. Визначення перспективних напрямків розвитку навігаційного забезпечення судноводіння з використанням радіолокаційних систем // Новітні технології. – 2017. – №. 2. – С. 29-42.
2. Путятин В. Г. Влияние осадков на разрешающую способность радиолокационной станции по угловым координатам / В.Г. Путятин, Д.В. Корбан, А.И. Князь // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2017. – Т. 19, № 4. – С. 26–34.
3. Yadnya M. S. Attenuation model from drop size distribution of rain for millimeter wave communication channel / M. S. Yadnya, I. W. Sudiartha // 2017 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA). – IEEE, 2017. – PP. 1-4. DOI:10.1109/TSSA.2017.8272936.
4. Veselovska G. Modeling of scattering of electromagnetic waves by snow crystals / G. Veselovska, G. Khlopov // 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). – IEEE, 2017. – PP. 351-354. DOI:10.1109/YSF.2017.8126646.
5. Norouzian F. Rain attenuation at millimeter wave and low-THz frequencies / F. Norouzian, E. Marchetti, M. Gashinova, E. Hoare, C. Constantinou, P. Gardner, M. Cherniakov // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 68, № 1. – PP. 421-431. DOI:10.1109/TAP.2019.2938735.
6. Hong E. Terrestrial link rain attenuation measurements at 84 GHz / E. Hong, S. Lane, D. Murrell, N. Tarasenko, C. Christodoulou // 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSMS). – IEEE, 2017. – PP. 1-2. DOI:10.1109/USNC-URSI-NRSMS.2017.7878267.

7. Grabner M. Analysis of propagation of electromagnetic waves in atmospheric hydrometeors on low-elevation paths / M. Grabner, P. Pechac, P. Valtr // Radio-engineering. – 2018. – Vol. 27, № 1. – PP. 29-33. DOI:10.13164/re.2018.0029.
8. Nagel D. Detection of rain areas with airborne radar / D. Nagel // 2017 18th International Radar Symposium (IRS). – IEEE, 2017. – PP. 1-7. DOI:10.23919/IRS.2017.8008094.
9. Averyanova Y. Segregating deformation of scattering rain-drops using several receive antennas with different polarization angles / Y. Averyanova, A. Rudikova, F.J. Yanovsky // 2017 18th International Radar Symposium (IRS). – IEEE, 2017. – PP. 1-6. DOI:10.23919/IRS.2017.8008260.
10. Navarro K. M. M. Realistic rain model for the estimation of the rainfall rate from radar measurements / K.M.M. Navarro, E. Costa, C.A.M. Rodriguez, S. Cruz-Pol, L.V.L. Colón // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 67, № 9. – PP. 6104-6114. DOI:10.1109/TAP.2019.2921006.
11. Иванов О. В. Распространение электромагнитных волн в анизотропных и бианизотропных слоистых структурах / О. В. Иванов. – Ульяновск : УЛГТУ, 2010. – 262 с.
12. Коростелев А. А. Теоретические основы радиолокации / А.А. Коростелев, Н.Ф. Климов, Ю.А. Мельник. – Москва: Советское радио, 1978. – 607 с.
13. Седлецкий Р. М. Эффективная площадь рассеяния идеально проводящих тел простейшей формы в средах с комплексной проницаемостью / Р. М. Седлецкий // Журнал Радиоэлектроники. – 2001. – № 9. – С. 1-4.
14. Билетов М. В. Радиометеорология / М.В. Билетов, В.П. Кузьменко, Н.Ф. Павлов, Н.В. Цивенко. – Москва: Воениздат, 1984. – 208 с.
15. Шупяцкий А. Б. Радиолокационное измерение интенсивностей и некоторых других характеристик осадков / А.Б. Шупяцкий. – Москва: Гидрометеоздат, 1961. – 190 с.
16. Setijadi E. Effect of temperature and multiple scattering on rain attenuation of electromagnetic waves by a simple spherical model / E. Setijadi, A. Matsushima, N. Tanaka, G. Hendrantoro // Progress in Electromagnetics Research. – 2009. – Vol. 99. – PP. 339-354. DOI:10.2528/PIER09102609.
17. Odedina M. O., Afullo T. J. (2010) Determination of rain attenuation from electromagnetic scattering by spherical raindrops: Theory and experiment. Radio Science, Vol. 45, Iss. 1, pp. 1-15. DOI:10.1029/2009RS004192.

References

- [1] Trofimenko I. V. (2017) Determination of perspective directions of navigation support development shipping with the use of radar systems. *EMERGING TECHNOLOGIES*, Iss. 2(4), pp. 29-42.
- [2] Putyatin V. G., Korban D. V., Knyaz A. I. (2017) Influence of precipitations on angular coordinates resolution for a radar. *DATA RECORDING, STORAGE & PROCESSING*, Vol. 19, Iss. 4, pp. 26-34. DOI:10.35681/1560-9189.2017.19.4.142919.

- [3] Yadnya M. S., Sudiarta I. W. (2017) Attenuation model from drop size distribution of rain for millimeter wave communication channel. *11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA)*, pp. 1-4. DOI:10.1109/TSSA.2017.8272936.
- [4] Veselovska G., Khlopov G. (2017) Modeling of scattering of electromagnetic waves by snow crystals. *IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, pp. 351-354. DOI:10.1109/YSF.2017.8126646.
- [5] Norouzian F., Marchetti E., Gashinova M., Hoare E., Constantinou C., Gardner P., Cherniakov M. (2020) Rain attenuation at millimeter wave and low-THz frequencies. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 68, Iss. 1, pp 421-431. DOI:10.1109/TAP.2019.2938735.
- [6] Hong E., Lane S., Murrell D., Tarasenko N., Christodoulou C. (2017) Terrestrial link rain attenuation measurements at 84 GHz. *United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*, pp. 1-2. DOI:10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878267.
- [7] Grabner M., Pechac P., Valtr P. (2018) Analysis of Propagation of Electromagnetic Waves in Atmospheric Hydrometeors on Low-Elevation Paths. *Radioengineering*, Vol. 27, Iss. 1, pp. 29-33. DOI:10.13164/re.2018.0029.
- [8] Nagel D. (2017) Detection of rain areas with airborne radar. *18th International Radar Symposium (IRS)*, pp. 1-7. DOI:10.23919/IRS.2017.8008094.
- [9] Averyanova Y., Rudiakova A., Yanovsky F. J. (2017) Segregating deformation of scattering rain-drops using several receive antennas with different polarization angles. *18th International Radar Symposium (IRS)*, pp. 1-6. DOI:10.23919/IRS.2017.8008260.
- [10] Navarro K. M. M., Costa E., Rodriguez C. A. M., Cruz-Pol S., Colón L. V. L. (2019) Realistic Rain Model for the Estimation of the Rainfall Rate from Radar Measurements. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 67, Iss. 9, pp. 6104-6114. DOI:10.1109/TAP.2019.2921006.
- [11] Ivanov O.V. (2010). *Rasprostraneniye e'lektromagnitny'kh voln v anizotropny'kh i bianizotropny'kh sloisty'kh strukturakh* [Propagation of electromagnetic waves in anisotropic and bianisotropic layered structures]. Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, 262 p. [In Russian].
- [12] Korostelev A. A., Klimov N. F., Melnik Yu. A. (1978) *Teoreticheskie osnovy' radiolokaczii* [Theoretical foundations of radar]. Moscow: Soviet radio, 607 p. [In Russian].
- [13] Sedletsky R. M. (2001) E'ffektivnaya ploshhad' rasseyaniya ideal'no provodyashhikh tel prostejshej formy' v sredakh s kompleksnoj proniczaemost'yu [Effective scattering area of ideally conducting bodies of the simplest shape in media with complex permeability]. *Journal of Radioelectronics*, Vol. 9, pp. 1-4. [In Russian].
- [14] Biletov M. V., Kuzmenko V. P., Pavlov N. F. and Tsivenko N. V. (1984) *Radiometeorologiya* [Radiometeorology]. Moscow: Military Publishing, 208 p. [In Russian].
- [15] Shupyatskiy A. B. (1961) *Radiolokaczionnoe izmerenie intensivnostej i nekotory'kh drugikh kharakteristik osadkov* [Radar measurement of intensities and some other characteristics of precipitation]. Moscow: Gidrometeoizdat, 190 p. [In Russian].
- [16] Setijadi E., Matsushima A., Tanaka N., Hendratoro G. (2009) Effect of temperature and multiple scattering on rain attenuation of electromagnetic waves by a simple spherical model. *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 99, pp. 339-354. DOI:10.2528/PIER09102609.
- [17] Odedina M. O., Afullo T. J. (2010) Determination of rain attenuation from electromagnetic scattering by spherical raindrops: Theory and experiment. *Radio Science*, Vol. 45, Iss. 1, pp. 1-15. DOI:10.1029/2009RS004192.

Влияние осадков на работу судновой радиолокационной системы при наблюдении за навигационными объектами

Ревенко В. Ю.

Влияние выпадающих осадков на работу судовой радиолокационной системы (РЛС) проявляется в виде ослабления мощности электромагнитной волны и ухудшения радиолокационной наблюдаемости навигационных объектов, находящихся или в зоне выпадающих осадков, или за их зоной. Наличие осадков по трассе распространения электромагнитной волны приводит к уменьшению дальности и вероятности обнаружения навигационных объектов судовой РЛС. В этой работе представлены результаты моделирования затухания мощности волны и получения энергетических характеристик матрицы потерь внутри радиолокационного объема выпадающих осадков. Показано, что радиофизическую информацию об объекте наблюдения судовой РЛС можно получить по значениям матрицы потерь мощности электромагнитной волны внутри объекта, элементы которой являются энергетическими характеристиками эхо-сигнала электромагнитной волны. Установлено, что коэффициенты матрицы потерь эхо-сигнала атмосферного образования определяются интенсивностью осадков и углами поляризации внутри радиолокационного объекта.

Ключевые слова: радиолокационные системы; метеорологические образования; плоская электромагнитная волна; поглощение и рассеяние электромагнитной энергии

Effects of Precipitation on the Performance of Shipboard Radar Installations

Revenko V. Y.

Precipitation may affect a ship's radar performance, namely, attenuate a radar electromagnetic wave and thus hinder objects detection within the precipitation zone. The presence of precipitation along a path of electromagnetic wave propagation leads to a decrease in the range and probability of objects detection. When an electromagnetic wave encounters precipitation particles, part of the carried energy converts into heat and dissipates in different directions. The reflected energy propagates toward the ship's radar antenna and creates false signals. This paper presents the results of modeling of electromagnetic wave attenuation with regard to precipitation intensity in the precipitation zone. The proposed matrix of energy attenuation helps to establish the physics of the endoatmospheric object and forecast the range of objects detection based on it. The study shows that radiophysical information about the desired object can be obtained by using the attenuation matrix

with data on the strength of echo signals. It was established that coefficients in the echo signal attenuation matrix were influenced by precipitation intensity and polarization angles inside the precipitation zone. The greatest attenuation was seen with particles taking the form of flattened ellipsoids (this is common during intense rainfall episodes). The elongated particles also were found to cause attenuation of the electromagnetic wave. Particles with a spherical shape,

which are commonly formed as fog, were found to have no implications associated with the electromagnetic signal attenuation. The results of the study can be useful in estimating attenuation of echo signals that propagate from objects to the ship's radar system under precipitation.

Key words: radar system; weather event; plane electromagnetic wave; absorption and scattering of electromagnetic radiation