

Ревенко В. Ю.

СКОРОЧЕННЯ ДАЛЬНОСТІ ВИДИМОСТІ МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ СУДНОВОЮ РЛС В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ІНТЕНСИВНОСТІ ВИПАДАЮЧИХ ОПАДІВ

Радіолокаційні методи дослідження впливу опадів на радіолокаційне спостереження морських об'єктів засновані на відображенні та розсіюванні електромагнітних хвиль поверхнею навігаційного об'єкту та частинками випадаючих опадів. Падаюча електромагнітна хвиля збуджує на поверхні морського об'єкта і частинках випадаючих опадів вторинне випромінювання, яке поширюється в напрямку на суднову РЛС.

Для оцінки відбиваючих властивостей морського об'єкта і випадаючих опадів вводиться ефективна площа зворотного розсіювання. Випадаючі опади також послаблюють падаюче на них випромінювання від системи суднової РЛС і призводять до зменшення потужності електромагнітної енергії, що надходить на вхід приймача РЛС, відображеної від морського об'єкта. При цьому зменшується дальність радіолокаційної видимості морського об'єкта в зоні випадаючих опадів.

Тому виникає необхідність встановлення впливу опадів на радіолокаційне спостереження морських об'єктів на шляху судна. Основою для отримання методу радіолокації прогнозу дальності видимості морського об'єкта на мінімальній дальності його маскування в опадах є рівняння радіолокації морського об'єкта і зони випадаючих опадів на шляху судна.

Зменшення заважаючої дії опадів на роботу суднової РЛС є одним з актуальних завдань підвищення ефективності використання радіолокаційних засобів. При проходженні електромагнітною хвилею шару дощу відбувається зменшення щільності потоку потужності. При падінні радіохвиль на зону випадаючого дощу, в якій знаходиться морський об'єкт, відбувається розсіювання електромагнітної енергії на сукупності довільно розташованих частинок дощу, що випадає, кожна має різну форму, фазовий стан, і їх довільне розташування викликає їх взаємний вплив, а падаюча хвиля поширюється в напрямку їх загальної осі симетрії. При певних співвідношеннях діаметрів частинок, відстані між ними і довжини хвилі, що розповсюджується через зону дощу, виникає додаткове сумарне поле, що обумовлюється багаторазовими перевідображеннями, які впливають на радіолокаційні характеристики дощів на шляху судна.

Ключові слова: *суднова РЛС, морський об'єкт, випадаючі опади, дальність радіолокаційної видимості, дальність маскування, інтенсивність опадів, ефективна площа розсіювання.*

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. В даний час у зв'язку з бурхливим розвитком морських перевезень забезпечення безпеки судноводіння з використанням суднових станцій радіолокації є найважливішим завданням, проте вплив небезпечних метеорологічних об'єктів на роботу суднової РЛС дотепер повністю не досліджено. Незважаючи на використання на судах морського флоту систем супутникової навігації GPS, GLONASS, обладнання суден сучасними засобами навігації та попередження

зіткнень автоматичними приймачами індикаторами супутникових радіонавігаційних систем, САРП та АІС, ступінь контролю за місцем розташування зустрічного судна на безпечній відстані від свого судна за інтенсивних випадаючих опадів не відповідає сучасним вимогам щодо недопущення зіткнення суден у складних умовах атмосферного середовища. Тому підвищення ефективності вимірювання радіолокації дальності до зустрічного судна, що знаходиться в інтенсивному атмосферному утворенні, є актуальним науковим напрямом.

Аналіз останніх досягнень та публікацій, в яких розпочато вирішення даної проблеми. У роботі [1] розглянуто питання навігаційної безпеки не лише за лоцманської проводки суден, а й проблеми підвищення інформаційної ефективності під час використання суднових РЛС. У роботі [2] проведено аналіз використання суднових радіолокаційних та радіонавігаційних систем для забезпечення безпеки судноводіння, вказано недоліки у використанні їх інформаційного забезпечення. У роботі [3] проведено аналіз суднових навігаційних систем, в якому аналізується як їх принцип побудови, так і інформаційні можливості при радіолокаційному спостереженні морських об'єктів, зазначені переваги та недоліки інформативності параметрів радіолокації. У роботі [4] проводиться аналіз використання суднових радіолокаційних станцій у судноводінні, аналізується їх ефективність при спостереженні морських об'єктів, вказуються недоліки використовуваних параметрів електромагнітної хвилі. У роботі [5] представлена двоточкова статистична модель для імітації складного об'єкта радіолокації, представлений аналіз використання в даній моделі радіолокаційних сигналів суднової РЛС, зазначена їх недостатня інформативність.

Формулювання цілей статті (постановка задачі). Метою даної статті є аналіз впливу величини зворотного розсіювання на скорочення дальності видимості морських об'єктів в залежності від інтенсивності випадаючих опадів, в яких знаходиться зустрічне судно і ефективної поверхні розсіювання $\sigma_{\text{мо}}$.

Виклад основного матеріалу дослідження. Різні кінематичні особливості істотно впливають на радіолокаційне спостереження морських об'єктів на шляху судна. При цьому основний вплив на утворення інтенсивних злив на шляху судна має вологість повітря району плавання при циклонічних утвореннях суміжних територій. Інтенсивні зливи різко знижують радіолокаційний контраст зустрічного судна, що знаходиться в опадах і внаслідок цього скорочується максимальна дальність виявлення суднової РЛС і погіршуються умови спостереження.

Для оцінювання впливу відображення від опадів на маскуючий вплив їх радіолокаційних відображень на радіолокаційне відображення від морських об'єктів, необхідно оцінити потенційні можливості використання суднових РЛС у складних метеорологічних умовах, а також оцінити вплив властивостей морських об'єктів, що відбивають, на умову їх спостереження за наявності опадів різної інтенсивності.

При використанні на суднових РЛС індикаторів з відміткою яскравості, радіолокаційний контраст зображення морського об'єкта на тлі відбиття від зливових опадів, можна визначити з відомого рівняння радіолокації за допомогою наступного співвідношення:

$$R_{\text{кмо}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{P_{\text{отр мо}}}{P_{\text{отр ос}}}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{отр мо}}$ – величина потужності ехо-сигналу морського об'єкта;

$P_{\text{отр ос}}$ – величина потужності ехо-сигналу від опадів, у яких знаходиться навігаційний об'єкт.

Запишемо рівняння радіолокації для морського об'єкту та опадів певної інтенсивності:

$$P_{\text{мо}} = 10^{-20} \frac{P_{\text{н}} G^2 \lambda^2 \sigma_{\text{мо}} K}{(4\pi)^3 R^4}; \quad (2)$$

$$P_{\text{ос}} = 109,5 \cdot 10^{-22} \frac{P_{\text{н}} G^2 \tau \Theta^2 K K_3}{\lambda^2 R^2} I^{1,6}, \quad (3)$$

де $P_{\text{н}}$ – випромінювана потужність, кВт;
 G – коефіцієнт підсилення антени суднової РЛС;
 λ – довжина хвилі РЛС, см;
 Θ – ширина діаграми спрямованості антени суднової РЛС, град;
 τ – тривалість випромінюваних імпульсів, мкс;
 R – дальність до морського об'єкта, км;
 K – коефіцієнт ослаблення;
 K_3 – коефіцієнт заповнення об'єму радіолокації частинками випадуючих опадів;
 $\sigma_{\text{мо}}$ – ефективна площа розсіювання електромагнітної енергії поверхнею морського об'єкта

Після підстановки (2) та (3) у співвідношення (1), отримаємо:

$$R_{\text{кмо}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{\text{мо}} \Pi_3}{2200 R^2 I^{1,6}}}, \quad (4)$$

де Π_3 – енергетичний потенціал суднової РЛС.

Аналіз рівняння (4) показує, що зі зменшенням відбиваючих властивостей морського об'єкта і зі збільшенням інтенсивності випадуючих опадів на шляху судна контраст радіолокаційного зображення $R_{\text{кмо}}$ морського об'єкта на індикаторі суднової РЛС зменшується. Для кожної інтенсивності опадів і типу суднової РЛС той самий морський об'єкт, що знаходиться на тлі або в опадах певної інтенсивності,

забезпечуватиме на вході приймача різні відношення $\frac{P_{\text{отр мо}}}{P_{\text{отр ос}}}$. При відомих енергетичних

параметрах суднової РЛС, відбиваючих властивостях морського об'єкта та умовах радіолокаційного спостереження морського об'єкта, відношення потужності ехо-сигналу опадів може бути обчислено. Мінімальне відношення ехо-сигналів потужності N_{min} , при якому ще можливе виявлення морського об'єкта судновою РЛС за наявності випадуючих опадів, визначається з наступного співвідношення:

$$N_{\text{min}} = \left(\frac{P_{\text{мо}}}{P_{\text{ос}}} \right)_{\text{min}} = \frac{\sigma_{\text{мо}}}{2200 R^2 I^{1,6} K_3} \Pi_3. \quad (5)$$

При $\sigma_{\text{мо}} = \text{const}$ і $I = \text{const}$ величина N буде обернено пропорційною квадрату відстані та величині N буде відповідати така відстань до морського об'єкта, більше якої морський об'єкт не буде видно судною РЛС, і у співвідношенні (5) відстань буде відповідати максимальній відстані радіолокаційного бачення морського об'єкта за умов спостереження, тобто дальності маскування морського об'єкта опадами:

$$N = \frac{\sigma_{\text{мо}}}{2200R_M^2 I^{1,6} K_3} \Pi_3. \quad (6)$$

З (6) визначається дальність маскування морського об'єкта випадючими опадами:

$$R_M = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{мо}}}{2200NI^{1,6} K_3} \Pi_3}. \quad (7)$$

Після підстановки (6) і (7) формула для R_M запишеться у вигляді:

$$R_M = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{мо}}}{I^{1,6}}} \cdot \frac{\lambda^2}{10\sqrt{22N\tau\Theta_1\Theta_2 K_3}} = R'_M \Pi_3, \quad (8)$$

де $\Pi_3 = \frac{\lambda^2}{10\sqrt{22N\tau\Theta_1\Theta_2 K_3}}.$

Всі величини, що входять у Π_3 , відомі заздалегідь, тому співвідношення для R'_M запишеться у вигляді:

$$R'_M = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{мо}}}{I^{1,6}}}. \quad (9)$$

Таким чином, для знаходження R'_M , оператору суднової РЛС необхідно знати ефективну площу розсіювання даного типу судна та інтенсивність випадючих опадів, яку можна виміряти в процесі радіолокаційного спостереження морського об'єкта.

Теоретичний розрахунок R'_M для відомої σ та інтенсивності випадюють опадів представлений на рис. 1.

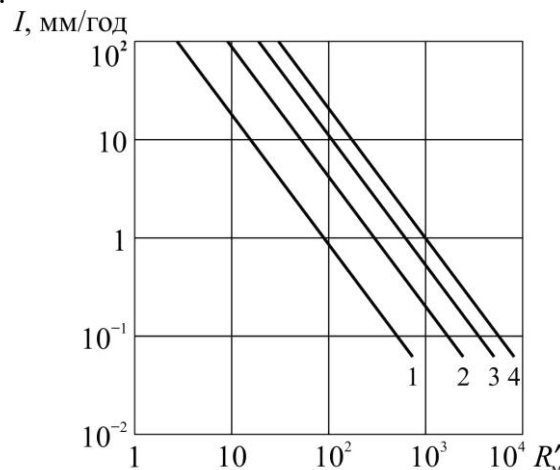


Рисунок 1 — Залежність дальності маскування R'_M морських об'єктів від інтенсивності опадів з урахуванням ефективної поверхні судна:

$$1 - \sigma_{\text{мо}} = 1 \text{ м}^2 \quad 2 - \sigma_{\text{мо}} = 10 \text{ м}^2 \quad 3 - \sigma_{\text{мо}} = 25 \text{ м}^2 \quad 4 - \sigma_{\text{мо}} = 100 \text{ м}^2$$

Висновки.

1. Проведено аналіз можливості проведення радіолокаційного контрасту зображення морського об'єкта на тлі відбиття радіолокаційного сигналу від зливових опадів різної інтенсивності.

2. Показано вплив інтенсивності опадів на зменшення контрасту радіолокаційного зображення морських об'єктів.

3. Проведений аналіз показав, що при знаходженні морського об'єкта в опадах або на їхньому тлі на вході приймача суднової РЛС спостерігається залежність співвідношення потужності ехо-сигналу морського об'єкта до ехо-сигналу опадів від інтенсивності випадаючих опадів.

4. Визначено дальність маскування морського об'єкта випадаючими опадами за відомої ефективної площі розсіювання морського об'єкта та випромінюваної інтенсивності випадаючих опадів.

5. Подальші дослідження необхідно продовжити у напрямку радіолокаційного виміру інтенсивності опадів судновою РЛС на шляху судна.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Вильский Г. Б.,** Мальцев А. С., Бездольный В. В., Гончаров Е. И. Навигационная безопасность при лоцманской проводке судов. Одесса: «Феникс», 2007. 445 с.
2. **Демиденко П. П.** Судовые радиолокационные и радионавигационные системы. Одесса: «Феникс», 2009. 372 с.
3. **Вагущенко В. В.** Судовые навигационные информационные системы. Одесса: «Феникс», 2004. 302 с.
4. **Морозов А. В.** РЛС в судовождении. Одесса: ВПП «Друкарський дім», 2013. 464 с.
5. **Козлов И. М.** Параметры двухточечной статистической модели для Имитации сложного радиолокационного объекта. Вісті вищих учбових закладів. Радіоелектроніка, 43(6). С. 19-23.
6. **Трофименко І. В.** Визначення перспективних напрямків розвитку навігаційного забезпечення судноводіння з використанням радіолокаційних систем. Новітні технології. 2017. № 2. С. 29-42.
7. **Путятин В. Г.,** Корбан Д.В., Князь А.И. Влияние осадков на разрешающую способность радиолокационной станции по угловым координатам. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2017. Т. 19, № 4. С. 26–34.
8. **Иванов О. В.** Распространение электромагнитных волн в анизотропных и бианизотропных слоистых структурах. Ульяновск : УлГТУ, 2010. 262 с.
9. **Седлецкий Р. М.** Эффективная площадь рассеяния идеально проводящих тел простейшей формы в средах с комплексной проницаемостью. Журнал Радиоэлектроники. 2001. No 9. С. 1-4.
10. **Yadnya M. S.,** Sudiarta I. W. Attenuation model from drop size distribution of rain for millimeter wave communication channel. 2017 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA). IEEE, 2017. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TSSA.2017.8272936>.
11. **Veselovska G.,** Khlopov G. Modeling of scattering of electromagnetic waves by snow crystals. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). IEEE, 2017. P. 351-354. <https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126646>.
12. **Norouzian F.,** Marchetti E., Gashinova M., et al. Rain attenuation at millimeter wave and low-THz frequencies. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 68, No 1. P. 421-431. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2938735>.

13. **Hong E.**, Lane S., Murrell D., et al. Terrestrial link rain attenuation measurements at 84 GHz. 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). IEEE, 2017. P. 1-2. <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878267>.
14. **Grabner M.**, Pechac P., Valtr P. Analysis of propagation of electromagnetic waves in atmospheric hydrometeors on lowelevation paths. Radioengineering. 2018. Vol. 27, No 1. P. 29-33. <https://doi.org/10.13164/re.2018.0029>.
15. **Nagel D.** Detection of rain areas with airborne radar. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-7. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008094>.
16. **Averyanova Y.**, Rudi-akova A., Yanovsky F.J. Segregating deformation of scattering raindrops using several receive antennas with different polarization angles. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-6. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008260>.
17. **Navarro K. M. M.**, Costa E., Rodriguez C.A.M., et al. Realistic rain model for the estimation of the rainfall rate from radar measurements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67, No. 9. P. 6104-6114. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2921006>.
18. **Setijadi E.**, Matsushima A., Tanaka N., et al. Effect of temperature and multiple scattering on rain attenuation of electromagnetic waves by a simple spherical model. Progress in Electromagnetics Research. 2009. Vol. 99. P. 339-354. <https://doi.org/10.2528/PIER09102609>.
19. **Odedina M. O.**, Afullo T. J. Determination of rain attenuation from electromagnetic scattering by spherical raindrops: Theory and experiment. Radio Science. 2010. Vol. 45, Iss. 1, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1029/2009RS004192>.

REFERENCES

1. **Vil'skij G. B.**, Mal'cev A. S., Bezdol'nij V. V., Goncharov E. I. Navigacionnaya bezopasnost' pri loemanskoj provodke sudov [Navigational safety in ship pilotage]. Odessa: «Feniks», 2007. 445 p.
2. **Demidenko P. P.** Sudovye radiolokacionnye i radionavigacionnye sistemy [Shipborne radar and radio navigation systems]. Odessa: «Feniks», 2009. 372 p.
3. **Vagushchenko V. V.** Sudovye navigacionnye informacionnye sistemy [Ship navigation information systems]. Odessa: «Feniks», 2004. 302 p.
4. **Morozov A. V.** RLS v sudovozhdenii [Radar stations in navigation]. Odessa: VPP «Drukars'kij dim», 2013. 464 p.
5. **Kozlov I. M.** Parametry dvoutochechnoj statisticheskoj modeli dlya Imitacii slozhnogo radiolokacionnogo ob'ekta [Parameters of a Two-Point Statistical Model for Simulating a Complex Radar Object]. Visti vishchih uchbovoh zakladiv. Radioelektronika, 43(6). P. 19-23.
6. **Trofimenko I. V.** Vznachennya perspektivnih napryamkiv rozvitku navigaciinogo zabezpechennya sudnovodinnya z vikoristannyam radiolokaciinoh sistem [Determination of perspective directions of navigation support development shipping with the use of radar systems]. Novitni tekhnologii. 2017. No. 2. P. 29-42.
7. **Putyatin V. G.**, Korban D.V., Knyaz' A.I. Vliyanie osadkov na razreshayushchuyu sposobnost' radiolokacionnoï stancii po uglovym koordinatam [Influence of precipitation on the resolution of the radar station in angular coordinates]. Reestraciya, zberigannya i obrobka danih. 2017. T. 19, No. 4. P. 26-34.

8. **Ivanov O. V.** Rasprostranenie elektromagnitnyh voln v anizotropnyh i bianizotropnyh sloistyh strukturah [Propagation of electromagnetic waves in anisotropic and bianisotropic layered structures]. Ul'yanovsk : UIGTU, 2010. 262 p.
9. **Sedleckii R. M.** Effektivnaya ploshchad' rasseyaniya ideal'no provodyashchih tel prosteishei formy v sredah s kompleksnoi pronicaemost'yu [Effective scattering area of ideally conducting bodies of the simplest shape in media with complex permeability]. Zhurnal Radioelektroniki. 2001. No 9. P. 1-4.
10. **Yadnya M. S.,** Sudiarta I. W. Attenuation model from drop size distribution of rain for millimeter wave communication channel. 2017 11th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA). IEEE, 2017. P. 1-4. <https://doi.org/10.1109/TSSA.2017.8272936>.
11. **Veselovska G.,** Khlopov G. Modeling of scattering of electromagnetic waves by snow crystals. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF). IEEE, 2017. P. 351-354. <https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126646>.
12. **Norouzian F.,** Marchetti E., Gashinova M., et al. Rain attenuation at millimeter wave and low-THz frequencies. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 68, No 1. P. 421-431. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2938735>.
13. **Hong E.,** Lane S., Murrell D., et al. Terrestrial link rain attenuation measurements at 84 GHz. 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). IEEE, 2017. P. 1-2. <https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878267>.
14. **Grabner M.,** Pechac P., Valtr P. Analysis of propagation of electromagnetic waves in atmospheric hydrometeors on lowelevation paths. Radioengineering. 2018. Vol. 27, No 1. P. 29-33. <https://doi.org/10.13164/re.2018.0029>.
15. **Nagel D.** Detection of rain areas with airborne radar. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-7. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008094>.
16. **Averyanova Y.,** Rudi-akova A., Yanovsky F.J. Segregating deformation of scattering raindrops using several receive antennas with different polarization angles. 2017 18th International Radar Symposium (IRS). IEEE, 2017. P. 1-6. <https://doi.org/10.23919/IRS.2017.8008260>.
17. **Navarro K. M. M.,** Costa E., Rodriguez C.A.M., et al. Realistic rain model for the estimation of the rainfall rate from radar measurements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2019. Vol. 67, No. 9. P. 6104-6114. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2921006>.
18. **Setijadi E.,** Matsushima A., Tanaka N., et al. Effect of temperature and multiple scattering on rain attenuation of electromagnetic waves by a simple spherical model. Progress in Electromagnetics Research. 2009. Vol. 99. P. 339-354. <https://doi.org/10.2528/PIER09102609>.
19. **Odedina M. O.,** Afullo T. J. Determination of rain attenuation from electromagnetic scattering by spherical raindrops: Theory and experiment. Radio Science. 2010. Vol. 45, Iss. 1, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1029/2009RS004192>.

Revenko V. Yu.

REDUCTION OF THE RANGE OF VISIBILITY OF MARINE OBJECTS OF THE SHIP'S RADAR DEPENDING ON THE INTENSITY OF PRECIPITATION

Radar methods for researching the effect of precipitation on the radar observation of marine objects are based on the reflection and scattering of electromagnetic waves by the surface of the navigation object and precipitation particles. The incident electromagnetic wave excites

secondary radiation on the surface of the marine object and particles of precipitation, which propagates in the direction of the ship's radar.

To assess the reflective properties of a marine object and precipitation, the effective backscattering area is introduced. Precipitation also weakens the radiation from the ship's radar system incident on them and leads to a decrease in the power of electromagnetic energy entering the input of the radar receiver, reflected from the marine object. This reduces the range of radar visibility of a marine object in the zone of precipitation.

Therefore, there is a need to establish the effect of precipitation on the radar observation of marine objects on the way of the vessel. The basis for obtaining a radar method for predicting the visibility range of a marine object at the minimum distance of its masking in precipitation are the equations of radar of a marine object and the precipitation zone on the ship's path.

Reducing the interfering effect of precipitation on the operation of a ship's radar is one of the urgent tasks of increasing the efficiency of using radar facilities. As the electromagnetic wave passes through the rain layer, the power flux density decreases. When radio waves fall on a rainfall zone in which a marine object is located, electromagnetic energy is scattered on a set of randomly located rainfall particles, each of which has a different shape, and phase state. Their arbitrary arrangement causes their mutual influence, and the incident wave propagates in the direction of their common axes of symmetry. At certain ratios of particle diameters, the distance between them, and the wavelength propagating through the rain zone, an additional total field arises due to multiple reflections, which affect the radar characteristics of the rainfall on the ship's path.

Keywords: *ship's radar, marine object, precipitation, radar visibility range, masking range, precipitation intensity, effective scattering area.*