

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra28.03.224>
УДК 621.371(260).029.65
PACS 41.20.Jb;47.50.Cd

О.В. Букін¹, В.Г. Гутнік², Ю.Ф. Логвінов¹, М.Г. Резніченко¹

¹ Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
вул. Акад. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна
E-mail: logvinov@ire.kharkov.ua

² Радіоастрономічний інститут НАН України
вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна
E-mail: vicguta@i.ua

ВИБІР МОДЕЛІ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЯННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НВЧ-ДІАПАЗОНУ МОРСЬКОЮ ПОВЕРХНЕЮ З УРАХУВАННЯМ ЗАТІНЕНЬ

Предмет і мета роботи. Статтю присвячено аналізу значень питомих ефективних поверхонь розсіяння морської поверхні в надвисокочастотному діапазоні радіохвиль (НВЧ), які отримано теоретично та експериментально. Актуальність таких досліджень визначається потребою отримання характеристик розсіяння електромагнітних хвиль різними об'єктами на етапі моделювання. Метою роботи є вибір моделі зворотного розсіяння та розробка методики отримання оцінок питомих ефективних поверхонь розсіяння морської поверхні для заданих умов з урахуванням затінь.

Методи і методологія. Для досягнення поставленої мети використовувалися методи математичного моделювання. Результати моделювання порівнювались з експериментальними даними.

Результати. З огляду на дані моделювання, що враховують ефект затінення ділянок морської поверхні, з використанням експериментальних даних проведено порівняльний аналіз моделей отримання питомої ефективної поверхні розсіяння морської поверхні при малих кутах ковзання.

Висновки. Проведено аналіз значень питомих ефективних поверхонь розсіяння морської поверхні, отриманих розрахунковим шляхом для фацетної та двомасштабної моделей, а також експериментальних значень питомих ефективних поверхонь розсіяння. Отримано кількісні оцінки питомих ефективних поверхонь розсіяння морської поверхні з урахуванням ефекту затінь і проведено їхній аналіз.

Ключові слова: поширення радіохвиль, зворотне розсіяння, питома ефективна поверхня розсіяння.

Вступ

Зворотне розсіяння сигналів радіолокації від поверхні моря часто ставить серйозні обмеження перед радіолокаційними системами (РЛС) при ви-

рішенні традиційних радіолокаційних завдань: виявлення, вимірювання координат, розпізнавання цілей. В імпульсному обсязі корабельної та берегової РЛС, що працює за надводними та по-

Цитування: Букін О.В., Гутнік В.Г., Логвінов Ю.Ф., Резніченко М.Г. Вибір моделі зворотного розсіяння електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону морською поверхнею з урахуванням затінь. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2023. Т. 28. № 3. С. 224–233. <https://doi.org/10.15407/rpra28.03.224>

Citation: Bukin, A.V., Gutnik, V.G., Lohvinov, Yu.F., Reznichenko, N.G., 2023. Selection of SHF-backscattering model of the sea surface with regard to shadowing. *Radio Phys. Radio Astron.*, 28(3), pp. 224–233. <https://doi.org/10.15407/rpra28.03.224>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Статтю опубліковано відповідно до умов відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

вітряними цілями, крім самих цілей, як правило, знаходиться морська поверхня, розсіяння радіохвиль від якої створюють перешкоду та впливають на точність вирішення радіолокаційних завдань.

Для врахування завадного впливу розсіяння від морської поверхні необхідно знати його характеристики та зв'язок з параметрами РЛС і навколишнього середовища.

Основною характеристикою розсіяного морською поверхнею електромагнітного поля є інтенсивність розсіяння, яка характеризується питомою ефективною поверхнею розсіяння (ПЕПР). Це досить універсальна характеристика, яка залежить від багатьох факторів. Вона визначається, насамперед, ступенем хвилювання морської поверхні, параметри якого залежать від швидкості та напрямку приводного вітру, його тривалості, довжини розгону морських хвиль, наявності піни і бризок. ПЕПР морської поверхні істотно залежить також від довжини хвилі зондувального радіолокаційного сигналу, його поляризації, кута опромінення морської поверхні. Знання особливостей характеристик розсіяного морською поверхнею сигналу необхідне для розробки морських радіолокаційних систем, які працюють в умовах впливу на відбитий сигнал морської поверхні.

Обмежена кількість експериментальних даних щодо інтенсивності зворотного розсіяння електромагнітних хвиль для різноманіття умов і параметрів РЛС сприяла розробці моделей зворотного розсіяння радіохвиль, які дозволяли отримувати значення ПЕПР морської поверхні для конкретних умов і параметрів РЛС. Найбільш поширені в даний час дві моделі: фацетна та двомасштабна [1].

Ці моделі дають можливість отримати кількісні оцінки ПЕПР морської поверхні за заданих умов. Однак ці моделі мають істотний недолік — у них не враховується затінення ділянок морської поверхні гребенями морських хвиль при малих кутах ковзання.

Тому метою даної роботи є вибір моделі зворотного розсіяння, що враховує затінення, які зростають при зменшенні кута ковзання, та розробка методики отримання оцінок ПЕПР морської поверхні для заданих умов з урахуванням затінь.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз ПЕПР морської поверхні для фацетної та двомасштабної моделей, а також ПЕПР, отриманих експериментально;
- обрати модель, яка враховує ефект затінення ділянок морської поверхні;
- з використанням обраної моделі розробити методики отримання розрахункових значень ПЕПР і вимоги для них;
- отримати кількісні оцінки ПЕПР морської поверхні з урахуванням ефекту затінь і провести їхній аналіз.

Актуальність досліджень, проведених у роботі, визначається необхідністю подальшого розвитку уявлень про зворотне розсіяння радіохвиль сантиметрового та міліметрового діапазонів морською поверхнею при малих кутах ковзання, які можуть бути використаними при розробці нових корабельних і берегових РЛС, що працюють в умовах завадного розсіяння електромагнітних хвиль від морської поверхні.

1. Моделі зворотного розсіяння електромагнітних хвиль та методики їх розрахунку

Розглянемо дані, які отримано в рамках широко відомих [1, 2] моделей розсіяння електромагнітних хвиль поверхнями — фацетною та двомасштабною, а також експериментальним шляхом.

Фацетна модель. До створення фацетної моделі відбиття привели спостереження сонячного світла, відбитого від водної поверхні, покритої брижами. Морська поверхня подається як сукупності плоских майданчиків невеликих розмірів — фацетів.

Передбачається, що радіолокаційне розсіяння формується тільки фацетами. Якщо відомий розподіл нахилів фацетів, можна визначити інтенсивність відбитого сигналу [1].

При малих кутах ковзання ця модель дозволяє зробити такі висновки [1]:

- найбільш інтенсивно розсіюють фацети, периметр яких близький до значення $\lambda / 2$, де λ — довжина хвилі зондувального сигналу;
- розсіяння збільшується пропорційно квадрату нахилу граней фацетів, оскільки найінтенсивніше розсіюють фацети на гребені хвилі;

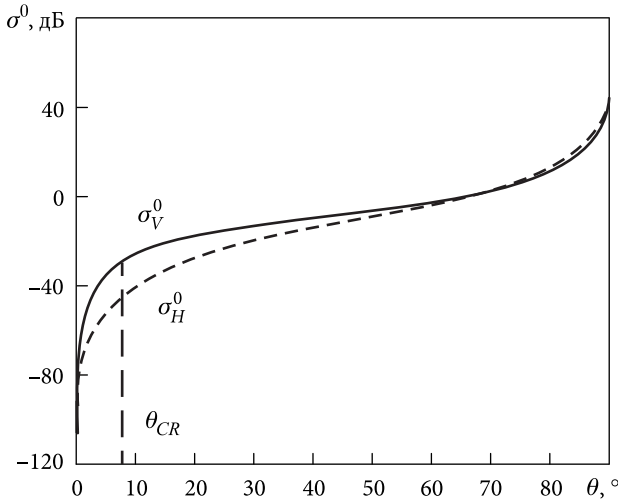


Рис. 1. ПЕПР морської поверхні

• ПЕПР морської поверхні (σ^0) залежить від довжини хвилі зондувального сигналу і зростає з укороченням довжини хвилі, це пов'язано з розподілом фацетів за розміром.

Одним із суттєвих недоліків фацетної моделі є те, що при малих кутах ковзання не враховується факт затінення ділянок морської поверхні.

Двомасштабна модель. Залежність інтенсивності морського хвилювання від швидкості вітру за умов слабкого хвилювання досить добре вивчено. Величину ПЕПР, що визначає інтенсивність розсіяного сигналу, можна знайти розрахунковим шляхом у рамках двомасштабної моделі [3], в якій морську поверхню показано у вигляді поверхні, що має неоднорідності двох характерних розмірів: порівнянних з довжиною хвилі зондувального сигналу (капілярні хвилі) і таких, що значно перевищують її (гравітаційні хвилі).

Величина ПЕПР для капілярних хвиль визначається в рамках методу малих збурень і описується виразом [3]:

$$\sigma_p^0(\theta, K) = 16\pi k^4 |\alpha_p(\varepsilon, \theta)|^2 S(K), \quad (1)$$

де $k = 2\pi\lambda^{-1}$ — хвильове число, λ — довжина хвилі зондувального сигналу; p — поляризація; θ — кут ковзання; $S(K)$ — просторовий спектр морського хвилювання по хвильових числах, де $K = 2\pi\Lambda^{-1}$, Λ — довжина морської хвилі; $\alpha_p(\varepsilon, \theta)$ — геометричний множник, що залежить від кута ковзання θ і комплексної діелектричної проникності ε , визначається виразами $\alpha_H(\varepsilon, \theta)$ —

для горизонтальної поляризації та $\alpha_V(\varepsilon, \theta)$ — для вертикальної поляризації:

$$\alpha_H(\varepsilon, \theta) = \frac{\sin^4(\theta)(\varepsilon - 1)}{[\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}]^2}; \quad (2)$$

$$\alpha_V(\varepsilon, \theta) = \frac{\sin^4(\theta)(\varepsilon - 1)[\varepsilon(1 - \sin^2\theta) - \sin^2\theta]}{[\varepsilon\cos\theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}]^2}. \quad (3)$$

У разі розвинутого морського хвилювання для отримання оцінки ПЕПР морської поверхні та її залежності від швидкості вітру необхідно провести усереднення за нахилами великих гравітаційних хвиль.

У [1] спектр морського хвилювання пропонується апроксимувати залежністю:

$$S(K) = BK^{-4}, \quad (4)$$

де $B \approx 10^{-3}$ — стала.

З використанням виразів (1)–(4) отримано розрахункові оцінки ПЕПР моря для горизонтальної σ_H^0 (штрихова лінія) та вертикальної σ_V^0 (суцільна лінія) поляризацій у залежності від кута ковзання θ . Їх наведено на рис. 1.

З рисунка видно, що для ковзних кутів, які менші $\theta_{CR} = 5...10^\circ$, характерна значна зміна ПЕПР при малих змінах кута ковзання, зумовлена інтерференцією та маскуючим ефектом «першої морської хвилі» на всі наступні [1]. У цьому діапазоні кутів ковзання ПЕПР пропорційна четвертому ступеню кута ковзання $\sigma^0 \sim \theta^4$, що випливає з виразів (1)–(3).

Слід зазначити, що в рамках двомасштабної моделі при апроксимації спектра морського хвилювання виразом (4) у НВЧ-діапазоні відсутня залежність ПЕПР морської поверхні від довжини хвилі зондувального сигналу [1].

Залежність ПЕПР від кута ковзання. Скористаємося результатами роботи [4], в якій узагальнено експериментальні дані ПЕПР залежно від кута ковзання, швидкості вітру, поляризації та довжини радіохвилі. У роботі [4] наведено та проаналізовано як оригінальні, так і дані інших авторів. Так, для швидкості вітру $U = 10$ м/с, вертикальної поляризації, довжини хвилі зондувального сигналу $\lambda = 3.2$ см автори роботи [4] зазначають, що ПЕПР має характерний кут ковзання θ_{CR} , який розташовано в районі 10 градусів,

нижче якого $\sigma^0 \sim \theta^4$, а для кутів більше θ_{CR} ПЕПР пропорційна куту ковзання — $\sigma^0 \sim \theta$. За даними авторів, значення критичного кута залежать від багатьох факторів, але здебільшого мають значення, близькі до кутів ковзання, менше яких слід враховувати факт затінення морської поверхні. Тому при розрахунках ПЕПР морської поверхні з урахуванням затіненя слід мати на увазі, що розрахункова ПЕПР повинна мати залежність $\sigma^0 \sim \theta^4$ при кутах ковзання менших критичного.

Залежність ПЕПР від швидкості вітру. У роботі [4] проведено аналіз експериментальних даних, який показав, що при зростанні швидкості вітру від 3 м/с до 15 м/с відбувається швидке збільшення ПЕПР, а за подальшого збільшення швидкості вітру зростання величини σ^0 сповільнюється. Експериментальні дані отримано на вертикальній та горизонтальній поляризаціях для довжини хвилі зондувального сигналу $\lambda = 3.2$ см і для довжини хвилі $\lambda = 0.8$ см. Зазначається, що ПЕПР у діапазоні швидкостей вітру 3...15 м/с зростає при збільшенні швидкості вітру і може набувати значень від -65 дБ до -25 дБ.

Залежність ПЕПР від довжини хвилі зондувального сигналу. На основі аналізу автори роботи [4] роблять висновок, що в більшості випадків для хвилювання в НВЧ-діапазоні, що встановився, величина ПЕПР обернено пропорційна довжині хвилі зондувального сигналу в степені $\gamma = 0.5 \dots 1.0$. Іншими словами, $\sigma^0 \sim \lambda^{-(0.5 \dots 1.0)}$. Так, при швидкості вітру 15 м/с для $\lambda = 0.8$ см ПЕПР дорівнює $\sigma^0 = -24$ дБ, а для $\lambda = 3.2$ см $\sigma^0 = -30$ дБ. Відношення довжин хвиль дорівнює 4, а різниця величин ПЕПР становить величину 6 дБ. Ці значення відповідають залежності $\sigma^0 \sim \lambda^{-1}$.

Вплив поляризації зондувального сигналу. На підставі аналізу, проведеного авторами роботи [4], можна припустити, що для хвилювання, яке встановилося, при малих кутах ковзання інтенсивність сигналів, розсіяних морською поверхнею, практично не залежить від поляризації зондувального сигналу.

Основні вимоги до розрахункових значень ПЕПР морської поверхні при малих кутах ковзання. Аналізуючи експериментальні дані, можна зазначити основні вимоги до розрахункових оцінок ПЕПР морської поверхні при малих кутах ковзання, які необхідно забезпечити в результаті

моделювання характеристик інтенсивності відбитого сигналу в умовах затінення ділянок морської поверхні:

1. При розрахунках має бути враховано вплив затіненя на ПЕПР морської поверхні.
2. Залежність розрахункових ПЕПР від кута ковзання при малих кутах ковзання повинна відповідати $\sigma^0 \sim \theta^4$.
3. Зі збільшенням швидкості вітру σ^0 має зростати.
4. Залежність розрахункових значень ПЕПР від довжини хвилі зондувального сигналу має відповідати закону $\sigma^0 \sim \lambda^{-(0.5 \dots 1.0)}$.
5. Практична відсутність залежності ПЕПР від поляризації зондувального сигналу при малих кутах ковзання.
6. Розрахункові значення ПЕПР повинні збігатися з експериментальними даними, отриманими для аналогічних умов.

Такі характеристики ПЕПР моря можуть бути забезпечені в рамках існуючих розрахункових моделей, а врахування затіненя на ПЕПР можна здійснити із залученням моделі морського хвилювання.

Модель морського хвилювання. Модель морського хвилювання є узагальненою методикою побудови цифрового профілю морського вітрового хвилювання стосовно радіофізичних завдань. Методика викладена у багатьох роботах, зокрема у [5]. Ця модель може бути корисна для характеристик електромагнітних хвиль при їхньому розсіянні на елементах морського хвилювання як при прямому поширенні електромагнітного поля, так і при його зворотному розсіянні.

У лінійному наближенні та декартовій системі координат висоту морського хвилювання в заданій точці з координатами x, y в момент часу t можна записати у вигляді суми великої кількості гармонічних коливань з різними частотами, амплітудами та випадковими фазами, рівномірно розподіленими від 0 до 2π [6]:

$$z(x, y, t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{S_{i,j}} \Delta\omega \Delta\theta \times \cos\left[\omega_i t + \xi_{i,j} - R_i(x \cos(\theta_j) + y \sin(\theta_j))\right],$$

де $S_{i,j}$ — дискретний відлік двовимірного спектра морського хвилювання; $\Delta\omega$ — ширина смуги

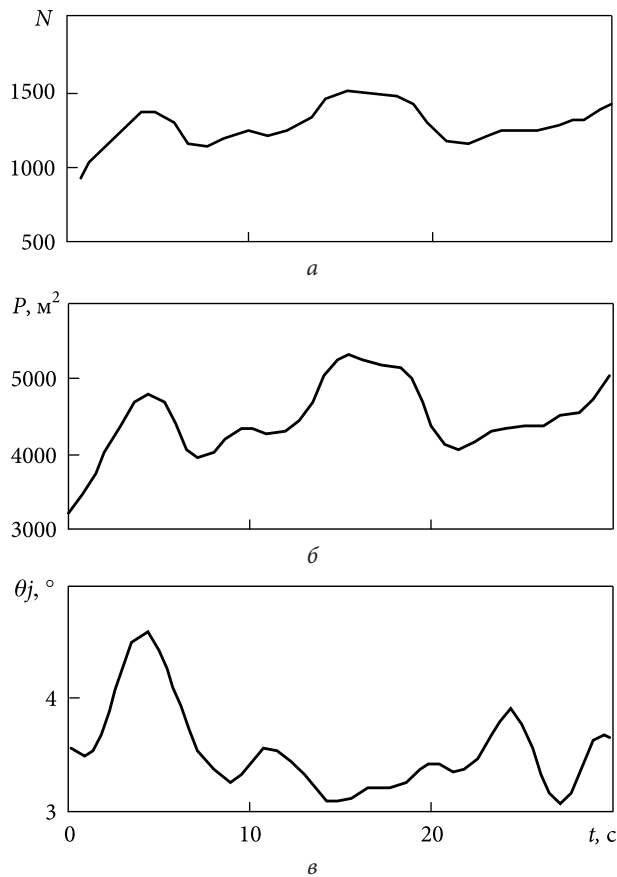


Рис. 2. Результати моделювання морського хвилювання: *a* — кількість відбиваючих фацетів; *б* — загальна площа фацетів; *в* — середній локальний кут ковзання

частот між відліками спектра морського хвилювання; $\Delta\theta$ — інтервал відліку кутів при дискретизації спектра морського хвилювання; $\xi_{i,j}$ — випадкова величина, має сенс початкової фази, що рівномірно розподілена на інтервалі від 0 до 2π ; ω_i — поточна частота; R_i — поточне хвильове число; θ_j — поточний кут; M, N — кількість дискретних відліків за частотою та за кутом відповідно. При цьому амплітуду елементарного коливання подають у вигляді добутку деякої функції (кореня квадратного від відліків двовимірного спектра) на квадратний корінь з добутку збільшення частоти $\Delta\omega$ і кута $\Delta\theta$.

Найчастіше в літературі при описі спектра вітрових хвиль оперують спектром Пірсона-Московитца для повністю розвиненого хвилювання [5]

$$S(\omega) = 8.1 \cdot 10^{-3} g^2 \omega^{-5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right],$$

де ω_m — частота максимуму спектра вітрового хвилювання; ω — поточна частота.

Модель морського хвилювання дозволяє синтезувати профіль морського хвилювання для заданих умов, визначати параметри фацетів, ступінь їхнього затінення при малих кутах ковзання, їхні розміри та кривизну, кут опромінення для кожного елементарного відбивача, їхню кількість на поверхні, що опромінюється.

Оцінки ПЕПР морської поверхні з урахуванням затінь та їхній аналіз. Методика отримання значень ПЕПР морської поверхні наступна:

1. За допомогою моделі морського хвилювання для заданих умов з'ясовано параметри фацетів, що відбивають: їхню кількість, площу, локальні кути ковзання.

2. У рамках фацетної моделі з'ясовано оцінки ПЕПР морської поверхні для заданих умов.

3. У рамках двомасштабної моделі з'ясовано оцінки ПЕПР морської поверхні для заданих умов.

Проведено моделювання морського хвилювання для ділянки морської поверхні 100×100 м на дальності $D = 1000$ м для висот передавача $H_1 = 10$ м і $H_2 = 50$ м (це відповідає кутам ковзання $\theta_1 = 0.6^\circ$ і $\theta_2 = 3^\circ$) для різних швидкостей вітру (5 м/с, 10 м/с, 15 м/с). За допомогою моделі морського хвилювання розрахунковим шляхом отримано параметри розсіюючих фацетів у залежності від часу. Було обрано тривалість реалізацій — 30 с. Розраховувалася кількість фацетів — N , їхня загальна площа — P , локальні кути ковзання θ_1 (це середній кут ковзання, під яким опромінюються фацети і який характеризує нахил фацетів).

Як приклад на рис. 2 наведено результати моделювання морського хвилювання для висоти передавача 50 м і швидкості вітру 15 м/с.

З рис. 2, *a* видно, що кількість відбиваючих фацетів на площі 100×100 м за 30 с змінюється від 1000 до 1500 штук. Їхня загальна площа (рис. 2, *б*) за цей час змінюється від 3000 м^2 до 5000 м^2 . Середній локальний кут ковзання (рис. 2, *в*) набуває значення $\theta_1 = 3.0^\circ \dots 4.5^\circ$. У табл. 1 наведено усереднені характеристики ділянки морського хвилювання залежно від швидкості вітру для висоти передавача $H_1 = 10$ м.

У табл. 2 наведено усереднені характеристики ділянки морського хвилювання залежно від

швидкості вітру для висоти передавача $H_2 = 50$ м. Позначення в таблицях: N — усереднена за 30 с кількість фацетів; P — усереднена загальна площа фацетів; P_i — середня площа фацета, що розсіює радіохвилі, отримана відношенням величини P на величину N ; θ_i — усереднений локальний кут ковзання для фацетів.

З табл. 1, 2 видно, що кількість фацетів N , які розсіюють радіохвилі, зменшується зі збільшенням швидкості вітру при різних висотах передавача.

Загальна площа фацетів збільшується зі зростанням швидкості вітру. Причому зі збільшенням висоти передавача (зростанням кута ковзання) загальна площа фацетів також зростає.

Локальний кут θ_i ковзання характеризує нахили локальних фацетів (див. рис. 2, в). Усереднене значення локального кута ковзання, як випливає з табл. 1, 2, зі збільшенням швидкості вітру трохи зменшується, але зі збільшенням висоти передавача величина θ_i збільшується.

Величина ПЕПР морської поверхні визначається розмірами відбивних майданчиків, їхньою сумарною площею та локальним кутом ковзання.

На основі одержаних результатів моделювання морської поверхні розрахунковим шляхом отримано оцінки ПЕПР морської поверхні. При цьому використовувалось дві методики.

Методика фацетної моделі. Для відомої кількості фацетів, їхньої загальної площі та локальних кутів ковзання розраховано ПЕПР моря. Знайдено середні площі P_i і локальні кути ковзання для кожного випадку (різних висот передавача та різних швидкостей вітру).

У припущенні, що фацети квадратні та мають ідеальну провідність, знайдено ефективну поверхню розсіяння (ЕПР) пластини з середньою площею P_i для середнього локального кута ковзання θ_i за формулою для ЕПР плоскої пластини [7]:

$$\sigma_i = \frac{4\pi}{\lambda^2} P_i^2 \sin^2 \theta_i \left[\frac{\sin\left(\frac{2\pi\sqrt{P_i} \cos \theta_i}{\lambda}\right)}{\frac{2\pi\sqrt{P_i} \cos \theta_i}{\lambda}} \right]^2.$$

З формули видно, що величина σ_i залежно від кута ковзання змінюється як функція $\sin x/x$ і

набуває максимального значення при куті ковзання, що дорівнює $\theta_i = 90^\circ$.

Потім знайдено загальну ЕПР усіх відбивних майданчиків за формулою:

$$\sigma = N\sigma_i.$$

Для знаходження ПЕПР морської поверхні σ^0 загальну ЕПР σ необхідно розділити на всю площу морської поверхні 100×100 м, для якої синтезувалося морське хвилювання:

$$\sigma^0 = \frac{N\sigma_i}{10^4}.$$

Величина σ^0 може бути виражена в децибелах:

$$\sigma^0 (\text{дБ}) = 10 \lg(\sigma^0).$$

Нижче наведено розрахункові оцінки ПЕПР морської поверхні на різних довжинах хвиль зондувального сигналу (10.0 см, 3.2 см, 0.8 см) в залежності від швидкості вітру U (5 м/с, 10 м/с, 15 м/с) для висоти передавача $H_1 = 10$ м (табл. 3) і $H_2 = 50$ м (табл. 4).

Розрахункові дані табл. 3 наведено на рис. 3 разом з експериментальними даними ПЕПР моря

Таблиця 1. Характеристики для $H_1 = 10$ м

U , м/с	5	10	15
N	25000	1600	365
P , м ²	1100	1100	1300
P_i , м ²	0.04	0.70	3.54
θ_i , °	2.70	2.47	2.15

Таблиця 2. Характеристики для $H_2 = 50$ м

U , м/с	5	10	15
N	87000	5900	1300
P , м ²	3800	4100	4400
P_i , м ²	0.04	0.70	3.52
θ_i , °	3.94	3.70	3.50

Таблиця 3. ПЕПР морської поверхні для $H_1 = 10$ м, фацетна модель

U , м/с	5	10	15
σ_{10}^0 , дБ	-47	-44	-42
$\sigma_{3.2}^0$, дБ	-41	-43	-47
$\sigma_{0.8}^0$, дБ	-41	-46	-48

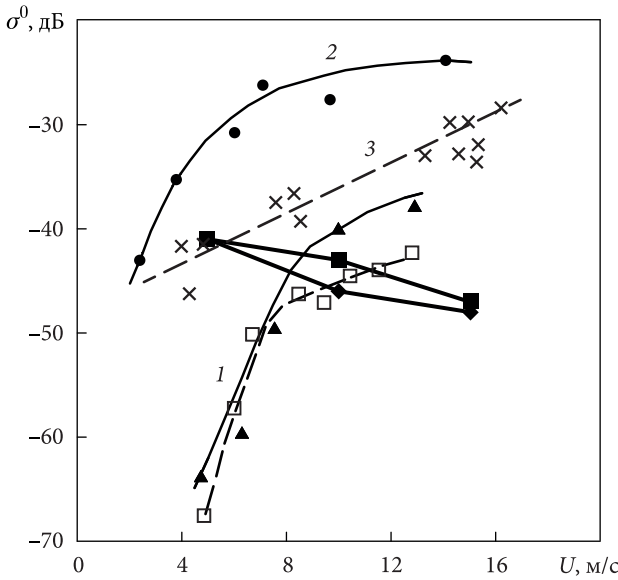


Рис. 3. Експериментальні та розрахункові значення ПЕПР, фацетна модель

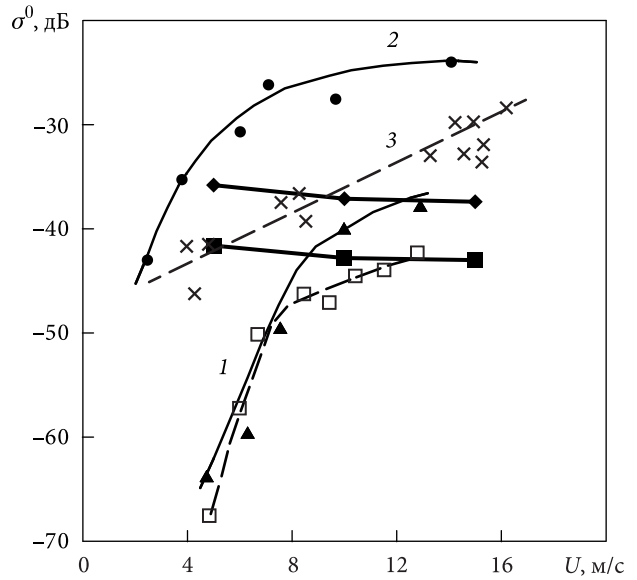


Рис. 4. Експериментальні та розрахункові значення ПЕПР, двомасштабна модель

роботи [4]. Дані отримано різними авторами для різних довжин хвиль зондувального сигналу. Криву 1, позначену квадратами та трикутниками, отримано на вертикальній і горизонтальній поляризаціях для довжини хвилі зондувального сигналу $\lambda = 3.2$ см. Для цієї довжини хвилі отримано залежність 3, позначену хрестиками. Криву 2, позначену кружками, отримано для довжини хвилі $\lambda = 0.8$ см.

Чорні квадрати — значення ПЕПР, отримані для довжини хвилі зондувального сигналу 3.2 см,

Таблиця 4. ПЕПР морської поверхні для $H_2 = 50$ м, фацетна модель

U, м/с	5	10	15
σ_{10}^0 , дБ	-39	-32	-43
$\sigma_{3.2}^0$, дБ	-32	-35	-40
$\sigma_{0.8}^0$, дБ	-34	-33	-33

Таблиця 5. ПЕПР морської поверхні для $H_1 = 10$ м, двомасштабна модель

U, м/с	5	10	15
A	0.11	0.11	0.13
σ_{10}^0 , дБ	-46.8	-48.0	-48.4
$\sigma_{3.2}^0$, дБ	-41.6	-42.8	-43.0
$\sigma_{0.8}^0$, дБ	-35.8	-37.1	-37.4

чорні ромби — значення, отримані для довжини хвилі зондувального сигналу 0.8 см.

Методика двомасштабної моделі. Для початку в рамках моделі морського хвилювання знаходиться коефіцієнт освітленості, що характеризує рівень затінення і дорівнює

$$A = \frac{P}{10^4}, \tag{5}$$

де 10^4 — опромінювана площа морської поверхні; P — загальна площа фацетів, що відбивають.

Потім у рамках двомасштабної моделі, використовуючи вирази (1), (3)–(5), знаходимо ПЕПР моря за формулою

$$\sigma^0 = A \cdot 16\pi k^4 |\alpha_p(\epsilon, \theta)|^2 B \cdot K^{-n}. \tag{6}$$

При виборі $n = 3$ забезпечується зростання ПЕПР з укороченням довжини хвилі зондувального сигналу. Розмір коефіцієнта B підбирається

Таблиця 6. ПЕПР морської поверхні для $H_2 = 50$ м, двомасштабна модель

U, м/с	5	10	15
A	0.38	0.41	0.44
σ_{10}^0 , дБ	-42	-42	-42
$\sigma_{3.2}^0$, дБ	-37.0	-37.0	-36.7
$\sigma_{0.8}^0$, дБ	-32	-31	-31

ся таким, щоб розрахункові значення ПЕПР відповідали експериментальним даним, відомим із літератури.

За виразом (6), при $B = 0.07$, розраховано значення ПЕПР морської поверхні для висот передавача $H_1 = 10$ м і $H_2 = 50$ м, для різних швидкостей вітру 5 м/с, 10 м/с, 15 м/с і різних довжин хвиль зондувального сигналу 10.0 см, 3.2 см, 0.8 см.

Розрахунки проводилися для кожної часової реалізації, у вираз (6) підставлялося 300 значень локального кута ковзання величини σ^0 . Таким чином враховувалися всі кути нахилів відбиваючих фацетів. Потім розраховувалось середнє значення ПЕПР.

Вище наведено результати розрахунків ПЕПР для різних значень коефіцієнта освітленості морської поверхні A і висоти передавача $H_1 = 10$ м (табл. 5) і $H_2 = 50$ м (табл. 6).

Розрахункові дані табл. 5 наведено разом з експериментальними даними ПЕПР морської поверхні роботи [4] на рис. 4. Розрахункові дані отримано для кута ковзання, близького до кута, для якого отримано експериментальні дані. Позначення експериментальних даних збігаються з рис. 3. Чорними квадратами позначені розрахункові значення ПЕПР, отримані для довжини хвилі зондувального сигналу 3.2 см, чорними ромбами — значення, отримані для довжини хвилі зондувального сигналу 0.8 см.

2. Порівняльний аналіз отриманих результатів

Для висот передавача $H_1 = 10$ м і $H_2 = 50$ м, для різних швидкостей вітру 5 м/с, 10 м/с, 15 м/с і різних довжин хвиль зондувального сигналу 10.0 см, 3.2 см, 0.8 см одержано розрахункові оцінки ПЕПР морської поверхні з урахуванням затіненень.

Для цього використано модель морського хвилювання, яка дозволяє визначати рівень затіненень і параметри фацетів, що розсіюють радіохвилі: кількість фацетів — N , їхня загальна площа — P , локальні кути ковзання θ_i (це середній кут ковзання, під яким опромінюються фацети).

У рамках фацетної моделі за цими параметрами розраховано ПЕПР морської поверхні в умовах затіненень. Дані табл. 5, 6 і рис. 4 дозволяють

стверджувати, що отримані значення ПЕПР якісно не співпадають з розрахунковими оцінками ПЕПР.

1. Відповідно до вимог при розрахунках враховано затінення морської поверхні.

2. При зростанні кута ковзання розрахункові значення ПЕПР збільшуються. Це відповідає експериментальним даним.

3. При збільшенні швидкості вітру від 5 м/с до 15 м/с розрахункові значення ПЕПР трохи зменшуються, що не відповідає даним експериментів.

4. При укороченні довжини хвилі зондувального сигналу розрахункові значення ПЕПР не зростають, а навіть зменшуються, що суперечить даним експериментів.

5. При розрахунках ПЕПР поляризація зондувального сигналу не враховувалася, тому залежність ПЕПР від поляризації відсутня.

6. Розрахункові значення ПЕПР за порядком величин не дуже відрізняються від експериментальних даних, отриманих для аналогічних умов.

Аналогічний аналіз значень ПЕПР у рамках двомасштабної моделі за відомими параметрами моделі морського хвилювання показав, що практично в усіх пунктах вони відповідають розрахунковим оцінкам. Тільки існує невідповідність за пунктом 3 — отримані розрахункові значення практично не залежать від швидкості вітру в діапазоні від 5 м/с до 15 м/с.

Слід зазначити, що методика розрахунків з використанням двомасштабної моделі є кращою з двох причин:

- розрахункові дані більшою мірою відповідають експериментальним даним;
- використання цієї методики дозволяє за допомогою вибору коефіцієнта B у виразі (6) коригувати величини розрахункових значень ПЕПР, а також їхню залежність від довжини хвилі зондувального сигналу за допомогою показника степеня n . Це дозволяє при розрахунках отримувати оцінки ПЕПР, що збігаються з експериментальними даними.

Висновки

На закінчення можна зазначити, що поставлену в роботі мету досягнуто — обрано модель зворотного розсіяння електромагнітного поля від морського хвилювання, яка найбільш точно

відповідає експериментальним даним з ПЕПР, у тому числі з урахуванням затінення морської поверхні.

У роботі вирішено такі завдання:

- проведено аналіз значень ПЕПР морської поверхні, отриманих розрахунковим шляхом для фацетної та двомасштабної моделей, а також експериментальних значень ПЕПР;

- обрано модель, яка враховує ефект затінення ділянок морської поверхні;

- з використанням цієї моделі розроблено методики отримання розрахункових значень ПЕПР і вироблено вимоги до них;

- отримано кількісні оцінки ПЕПР морської поверхні з урахуванням ефекту затінь і проведено їхній аналіз.

У процесі проведення роботи розширено модельні уявлення про характеристики зворотного розсіяння радіохвиль НВЧ-діапазону морської поверхню при малих кутах ковзання. Показано, що методика розрахунків із використанням двомасштабної моделі є кращою за фацетну модель.

Ці модельні уявлення можуть бути використані при розробці нових корабельних і берегових РЛС, що працюють в умовах відбитків від морської поверхні.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Разказовский В.Б. Кулемин Г.П. *Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами*. Киев: Наук. думка, 1987. 232 с.
2. Басс Ф.Г., Фукс И.М. *Рассеяние волн на статистически неровной поверхности*. Москва: Наука, 1972. 424 с.
3. Исимуру А. *Распространение и рассеяние волн в случайно неоднородных средах*. В 2-х томах. Т. 2. Пер. с англ. Москва: Мир, 1981. 317 с.
4. Кравченко В.Ф., Луценко В.И., Луценко И.В. *Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне*. Москва: Физматлит, 2015. 448 с. URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922116138.html>
5. Глазунов А.С., Гутник В.Г., Логвинов М.Ю., Логвинов Ю.Ф. Особенности моделирования морского волнения для радиофизических задач. *Радиофизика та електроніка*. 2017. Т. 22, № 2. С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2017.02.041>
6. Крылов Ю.М. *Спектральные методы исследования и расчета ветровых волн*. Ленинград: Гидрометеиздат, 1966. 255 с.
7. Ширман Я.Д. *Теоретические основы радиолокации*. Москва: Сов. радио, 1970. 560 с.

Стаття надійшла 25.04.2023

REFERENCES

1. Kulemin, G.P., Razkazovsky, V.B., 1987. *Scattering of millimeter radio waves by the surface of the Earth at small angles*. Kiev: Naukova Dumka Publ. (in Russian).
2. Bass, F.G., Fuks, I.M., 1972. *Dispersion of waves on a statistically uneven surface*. Moscow, USSR: Science Publ. (in Russian).
3. Ishimaru, A., 1981. *Propagation and scattering of waves in randomly inhomogeneous media*. Vol. 2. Translated from English. Moscow: Mir Publ. (in Russian).
4. Kravchenko, V.F., Lutsenko, V.I., Lutsenko, I.V., 2015. *The scattering of radio waves by the sea and the detection of objects against its background*. Moscow: Fizmatlit Publ. (in Russian). ISBN 978-5-9221-1613-8. [site]. Available from: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922116138.html>
5. Glazunov, A.S., Gutnik, V.G., Logvinov, M.Yu., Logvinov, Yu.F., 2017. Features of sea wave modeling for radiophysical problems, *Radiophys. Electron.*, **22**(2), pp. 41–49 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2017.02.041>
6. Krylov, Yu.M., 1966. *Spectral methods of research and calculation of wind waves*. Leningrad, USSR: Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
7. Shirman, Ya.D., 1970. *Theoretical foundations of radar*. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).

Received 25.04.2023

A.V. Bukin¹, V.G. Gutnik², Yu.F. Lohvinov¹, N.G. Reznichenko¹

¹ O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

² Institute of Radio Astronomy NAS of Ukraine
4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

SELECTION OF SHF-BACKSCATTERING MODEL OF THE SEA SURFACE WITH REGARD TO SHADOWING

Subject and Purpose. The article is devoted to the analysis of theoretically and experimentally obtained values of the specific effective sea-scattering surface in the region of super-high-frequencies (SHF). The study is reasoned by the need to know characteristics of the electromagnetic wave scattering from various objects at the modeling stage. The focus is on the choice of backscattering model with a methodology of specific effective scattering surface estimation that takes into account the shadowing effect of the sea surface under given conditions.

Methods and Methodology. The study is based on mathematical modeling techniques and is accompanied by the comparison of the modeling results with experiment.

Results. Proceeding from the simulation results with the effect of sea-surface shadowing taken into account and relying on the check of consistency with the measured data, a comparison analysis has been performed among theoretical models of specific effective sea-scattering surface calculation at low grazing angles.

Conclusion. Analysis has been given to the specific effective sea-scattering surface obtained by the facet and two-scale models and to the values measured by experiment. Quantitative estimates of the specific effective scattering surface have been obtained with the shadowing effect of the sea surface taken into account. Analysis of the quantitative estimates has been carried out.

Keywords: *radio wave propagation, backscattering, specific effective scattering surface.*