

# ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ І ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ

---

## WAVE PROPAGATION AND REMOTE SENSING

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra29.01.026>  
УДК 621.371.351:551.501.86

**В.Б. Замараєв, Ю.О. Педенко, В.Б. Синицький**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України  
вул. Акад. Проскури, 12, м. Харків, 61085, Україна  
E-mail: [vladimir.b.sinitskiy@gmail.com](mailto:vladimir.b.sinitskiy@gmail.com)

### ДІАГНОСТИКА МОРСЬКОГО ХВИЛЮВАННЯ ЗА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯМ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ В РІЗНИХ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНАХ

---

**Предмет і мета роботи.** Предметом досліджень є діагностика морського хвилювання сигналами штучних супутників Землі (ШСЗ) у схемі бістатичної радіолокації при ковзному поширенні радіохвиль, з використанням дифузної компоненти відбитого від поверхні сигналу. Мета роботи — вивчення можливості розширення досліджуваного діапазону морського хвилювання сигналами ШСЗ шляхом використання випромінювання супутників у різних частотних діапазонах.

**Методи та методологія.** Дослідження проведено за результатами натурних експериментів з навігаційними супутниками I («Транзит») та II (GPS) покоління, що заходять за горизонт над морською поверхнею. Зважаючи на динамічний характер експериментів, пов'язаний з наявністю рухомого джерела, при обробці результатів дослідів використовувались методи ковзного середнього та ковзного середньоквадратичного відхилення. Виділені з експериментальних сигналів дифузні компоненти використовувалися для оцінки ступеня морського хвилювання в конкретних дослідках. Засобами комп'ютерного моделювання здійснено порівняльний аналіз параметрів дифузних компонент при різних довжинах хвиль, кутах місця джерела та середньоквадратичних висотах морських хвиль.

**Результати.** Експерименти, проведені з супутниками GPS і «Транзит» в умовах штилю та помірного хвилювання, показують суттєву відмінність в інтенсивності дифузної компоненти флуктуацій сигналів, обумовленої морським хвилюванням, у кожній із систем і відповідають моделі, що базується на ефекті Релея для шорстких поверхонь. З огляду на це випромінювання супутників у різних частотних діапазонах може бути використане для розширення шкали досліджуваних значень морського хвилювання. При цьому високочастотному діапазону притаманна більша докладна, але обмежена шкала вимірюваних хвилювань, а додаткове застосування низькочастотного випромінювання дозволить розширити діапазон визначення ступеня морського хвилювання у бік великих значень.

**Висновки.** Установлено, що використання випромінювання супутників у різних частотних діапазонах дозволяє розширити діапазон визначення ступеня морського хвилювання.

**Ключові слова:** морське хвилювання, штиль, штучні навігаційні супутники Землі «Транзит», GPS, ефемериди, параметр Релея, дифузна компонента, середньоквадратична висота морських хвиль.

---

Ц и т у в а н н я: Замараєв В.Б., Педенко Ю.О., Синицький В.Б. Діагностика морського хвилювання за радіовипромінюванням штучних супутників Землі в різних частотних діапазонах. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2024. Т. 29, № 1. С. 26–37. <https://doi.org/10.15407/rpra29.01.026>

C i t a t i o n: Zamarayev, V.B., Pedenko, Yu.A., Sinitskiy, V.B., 2024. Sea wave diagnostics by radio emissions from artificial Earth satellites in different frequency bands. *Radio Phys. Radio Astron.*, **29**(1), pp. 26–37. <https://doi.org/10.15407/rpra29.01.026>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. 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, 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## Вступ

Дослідження ступеня морського хвилювання відіграє важливу роль як для практичних потреб, так і для завдань вивчення властивостей довкілля і розвитку фізичної теорії процесів, що відбуваються над морською поверхнею. Поряд із локальними вимірюваннями сили хвилювання за допомогою буїв та інших технічних засобів, останніми десятиліттями активно використовуються дистанційні методи, в тому числі за допомогою випромінювання штучних супутників Землі (ШСЗ). При цьому домінуючим є радіолокаційний метод зондування, заснований на аналізі форми імпульсу, відбитого від морської поверхні під час її надирного зондування. У фізичному аспекті метод використовує принцип відбиття імпульсного сигналу від квазідзеркальних ділянок (факетів) поверхні, причому за затримкою імпульсу визначається відстань до середнього рівня поверхні, а за розширенням імпульсу — ступінь хвилювання моря. Ідею методу покладено в основу супутникових систем, призначених спеціально для діагностики хвилювання (див. роботу [1] і бібліографію до неї). Розвиток таких систем потребував значних витрат на створення орбітальних угруповань супутників, наземної апаратури і розрахункових методик. У результаті досягнуто значного прогресу в підвищенні точності вимірювання характеристик хвилювання і можливості огляду великих площ, а також уточнено модель геоїда і карти швидкостей вітру.

Для оцінки ступеня хвилювання можливе застосування випромінювання супутників, що виконують власні завдання, наприклад, сигналів сучасних супутникових радіонавігаційних систем — GPS, ГЛОНАСС або Galileo. Так, у низці робіт запропоновано використовувати сигнали GPS у різних схемах вимірювань. Для оцінки ступеня морського хвилювання і швидкості вітру над океаном виконано аналіз характеристик сигналів GPS, отриманих у схемі «супутник—поверхня—літак» [2]. В іншій схемі вимірювань [1, 3] запропоновано використовувати сигнали супутників GPS, прийняті апаратурою, розташованою на щоглі висотою до 200 м, установленій на березі поблизу урізу води. При цьому висувається вимога використовувати сигнали супутників, які перебувають під великими кутами місця. Такий спосіб аналогічний до згаданого вище [1],

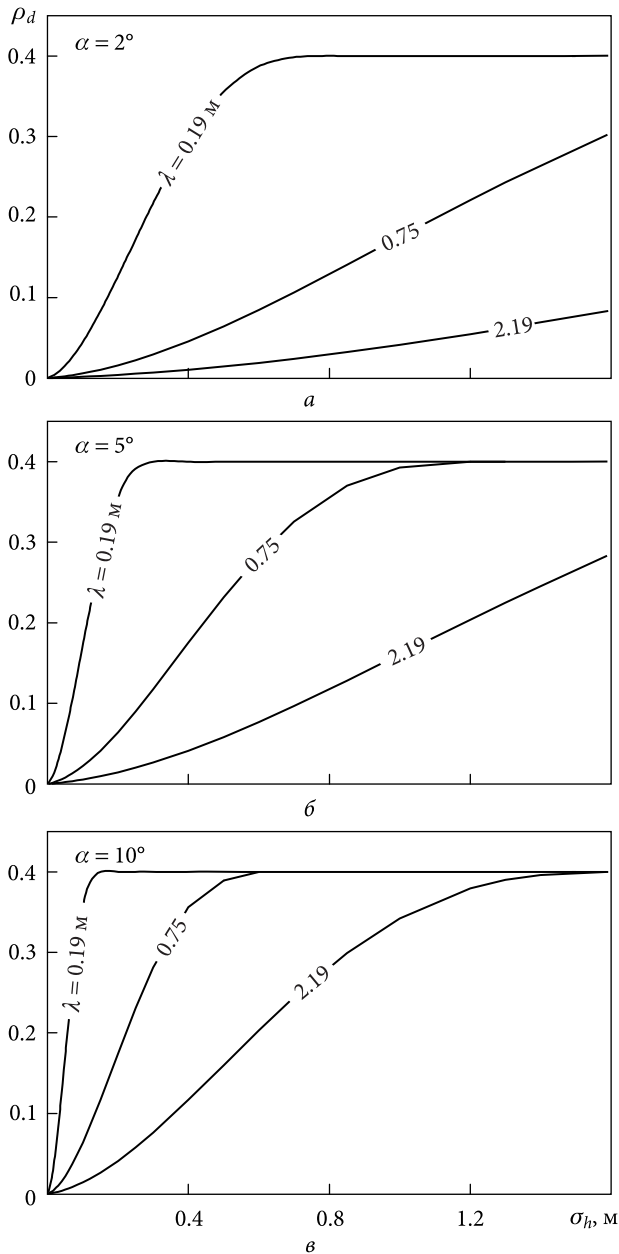
що реалізується із застосуванням супутникових радіолокаційних систем під час надирного зондування.

Як альтернативу може бути застосовано інший підхід, у якому використовують сигнали супутників, розташованих поблизу горизонту. У цьому випадку сила морського хвилювання може бути визначена шляхом вимірювання дифузної компоненти сигналів, що приймаються, величина якої за ковзних кутів поширення радіохвиль функціонально пов'язана з висотою морських хвиль.

Раніше в [4] було показано можливість оцінювання ступеня морського хвилювання за сигналами супутника GPS під час його заходу за горизонт над поверхнею моря. Ідея виникла як супутній результат досліджень, спрямованих на вивчення тропосферної рефракції над морем [5, 6]. Приводом для неї стали шумоподібні складові, що спостерігалися під час експериментів на частині реалізацій і ототожнювалися з впливом дифузного відбиття від схвильованої поверхні моря. Після опрацювання результатів вимірювань [4] і зіставлення цих складових із моделлю [7], у [4] було також відзначено недолік методу, який полягає в обмеженні діапазону вимірюваних хвилювань унаслідок особливостей дифузного відбиття радіохвиль від моря в робочому діапазоні  $L1$  супутника GPS ( $\lambda = 0.19$  м, де  $\lambda$  — довжина хвилі радіовипромінювання). За попередніми оцінками, зазначене обмеження можна усунути за допомогою методики, що використовує випромінювання супутників на різних частотах, аналізу якої присвячено цю роботу.

## 1. Модель поля сигналів при поширенні радіохвиль над схвильованою поверхнею моря під малими кутами місця

Досліджуваний метод вимірювання ступеня морського хвилювання ґрунтується на застосуванні феноменологічної моделі [7], яка описує характеристики радіосигналів НВЧ-діапазону при поширенні над поверхнею моря під малими кутами місця. Основою її створення послужили експерименти над морською поверхнею, виконані на стаціонарних трасах. Численні експерименти, проведені в інших регіонах (як раніше [8] створення зазначеної моделі, так і пізніше, наприклад



**Рис. 1.** Розрахункові характеристики дифузної компоненти у функції середньоквадратичної висоти морських хвиль  $\sigma_h$  для деяких довжин радіохвиль у разі спостереження джерела випромінювання під різними кутами місця: а –  $\alpha = 2^\circ$ ; б –  $\alpha = 5^\circ$ ; в –  $\alpha = 10^\circ$

[9]), різною мірою доповнюють, розвивають і узагальнюють її основні положення.

Згідно з моделлю, прийнятий сигнал може бути представлений у вигляді суми прямого сигналу і відбитого від поверхні, що складається з когерентної і випадкової (дифузної) складових. Перша пов'язана із дзеркальним відбиттям, а дифузна — зумовлена відбиттями від схвильованої

поверхні моря. Залежно від інтенсивності хвилювання, співвідношення дзеркальної та дифузної компонент змінюється, і відповідно змінюються статистичні характеристики сигналу. Ця модель відповідає концепції Релея для шорстких поверхонь, в якій вигляд характеристик залежить від параметра шорсткості  $q = \sigma_h \sin \alpha / \lambda$ , де  $\sigma_h$  — середньоквадратична висота морських хвиль,  $\alpha$  — кут ковзання в точці дзеркального відбиття (в умовах наших експериментів практично дорівнює куту місця супутника).

Модель поля сигналів, розроблена в [7], може бути застосована і для супутникових трас за умови використання випромінювання джерел, розташованих під малими кутами місця. Зокрема, це можуть бути геостаціонарні супутники, спостережувані невисоко над горизонтом під фіксованим кутом, або навігаційні супутники, що заходять, рухаючись над морем, за горизонт. В останньому випадку завдання зі статичного, яким воно було на стаціонарних трасах, перетворюється на динамічне, що дає змогу отримувати точніші оцінки морського хвилювання завдяки використанню безперервної зміни фази інтерференції прямого і дзеркального сигналів, що надходять від ШСЗ. Його реалізація вимагає застосування спеціальних методик під час обробки експериментальних даних.

Оцінювання ступеня морського хвилювання відповідно до розглянутої вище моделі поля сигналів вимагає використання деяких характеристик, що описують відбиття радіосигналів від схвильованої поверхні моря. До них належать залежності коефіцієнтів дзеркального  $\rho_s$  і дифузного  $\rho_d$  відбиттів від параметра шорсткості  $q$ . Слід зазначити, що залежність  $\rho_s$ , наведена в [7], за малих значень добре описується теоретичною кривою Гаусса, але в разі перевищення деякого порога ( $q > 0.088$ ) падіння дзеркального відбиття, як показують натурні експерименти, сповільнюється порівняно з теоретичною залежністю. У зв'язку з цим коефіцієнт дзеркального відбиття в даній роботі визначався відповідно до [7] таким чином:

$$\begin{aligned} \rho_s &= \exp(-8\pi^2 q^2), & q \leq 0.088, \\ \rho_s &= \exp(-1.205 \lg q - 3.540), & q > 0.088, \end{aligned} \quad (1)$$

де перше рівняння відповідає теорії, а друге — є апроксимацією експериментальних даних.

Для визначення коефіцієнта дифузного відбиття будемо використовувати апроксимацію, отриману в [11] на підставі графічної залежності  $\rho_d(q)$ , наведеної в [10]:

$$\begin{aligned} \rho_d &= 0.794q + 108.3q^2 - \\ &- 1094q^3 + 3042q^4, \quad q \leq 0.137, \\ \rho_d &= 0.4, \quad q > 0.137. \end{aligned} \quad (2)$$

## 2. Аналіз можливості вимірювань хвилювання моря в різних частотних діапазонах на основі моделі поля

Розглянемо динаміку зміни функції  $\rho_d(q)$  залежно від змінних, що входять у параметр  $q$ . Для розрахунку обрано довжини хвиль, що відповідають діапазонам навігаційних супутників «Транзит» ( $\lambda = 0.75$  м) і GPS ( $\lambda = 0.19$  м), у яких проводили наші вимірювання [4–6, 12]. До розрахунку залучено і більш довгохвильовий діапазон, у якому випромінює метеорологічний супутник NOAA ( $\lambda \approx 2.19$  м).

На рис. 1 наведено результати розрахунків коефіцієнтів дифузного відбиття у функції середньоквадратичної висоти морських хвиль ( $\rho_d(\sigma_h)$ ) для радіохвиль 0.19, 0.75 і 2.19 м, за фіксованих кутів місця джерела 2, 5 і 10 градусів. З графіків випливає, що зі зростанням  $\sigma_h$  залежності  $\rho_d(\sigma_h)$  переходять в область плато, причому перехід відбувається раніше при коротшій довжині хвилі  $\lambda$  і більшому куті місця джерела  $\alpha$ . На ділянці плато вимірювання хвилювання неможливе, тут можна лише констатувати, що ступінь хвилювання перевищує значення  $\sigma_h$  в точці перегину, тобто в точці переходу від монотонного зростання до насичення. Як видно з рис. 1, випромінювання ( $\lambda = 0.19$  м) за кута спостереження  $5^\circ$  може бути застосоване для вимірювання значень до  $\sigma_h \approx 0.20 \dots 0.25$  м, а для вимірювання більших  $\sigma_h$  необхідно використовувати більш довгохвильове випромінювання. Цей тип графіків можна використовувати в разі нерухомих джерел (зокрема, геостационарних супутників, які випромінюють під певними кутами, наприклад GEOS).

На рис. 2 наведено графіки залежності коефіцієнта  $\rho_d$  від кута місця джерела  $\alpha$ , а як параметр використовується середньоквадратична висота морських хвиль  $\sigma_h$ . Вони розраховані для різ-

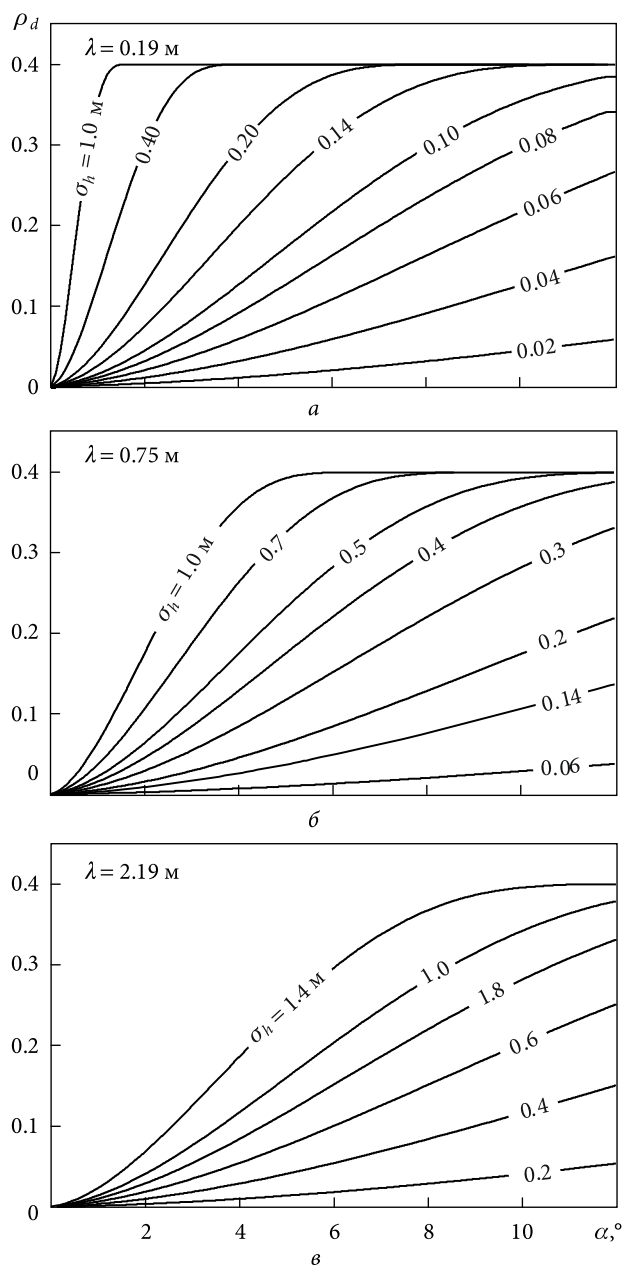


Рис. 2. Розрахункові характеристики дифузної компоненти у функції кута місця супутника за різної інтенсивності морського хвилювання  $\sigma_h$  для деяких довжин радіохвиль: а –  $\lambda = 0.19$  м; б –  $\lambda = 0.75$  м; в –  $\lambda = 2.19$  м

них довжин хвиль і зручні під час використання випромінювання рухомих джерел, зокрема навігаційних супутників.

Графіки залежностей на рис. 2 дають змогу оцінити ступінь придатності того чи іншого діапазону радіохвиль для визначення ступеня хвилювання. Так, із графіків на рис. 2, а випливає, що випромінювання на хвилі  $\lambda = 0.19$  м (GPS) придатне лише для вимірювання сили хвилювання в

діапазоні  $\sigma_h \approx 0.02 \dots 0.3$  м (хвилювання від 0 до 3...4 балів [10]). Щоб збільшити діапазон вимірювань до  $\sigma_h \approx 1$  м (хвилювання близько 6 балів), слід використовувати випромінювання на хвилі  $\lambda = 0.75$  м (рис. 2, б). Для розширення діапазону вимірюваних значень понад  $\sigma_h = 1$  м необхідно використовувати ще більш низькочастотне випромінювання, наприклад, супутників NOAA ( $\lambda \approx 2.19$  м, рис. 2, в).

Таким чином, використовуючи робочі частоти в різних діапазонах радіохвиль, можна розширити діапазон вимірюваних значень морського хвилювання.

### 3. Методика проведення натурних експериментів та апаратура

Експерименти проводилися на полігоні в східній частині Криму із супутниками «Транзит» (1987–1990 рр.) [12] і GPS (2001–2003 рр.) [4–6]. Основною спрямованістю дослідів у всіх серіях було вивчення проходження сигналів на загоризонтних трасах і трасах прямої видимості в умовах різної тропосферної рефракції. Додаткове опрацювання отриманих у ході експерименту матеріалів [4] дало змогу пов'язати характеристики

прийнятих від супутників GPS сигналів із хвилюванням моря.

У цій роботі проведено порівняльний аналіз характеристик сигналів супутників GPS і «Транзит», отриманих за умов, подібних щодо хвилювання моря. Для дослідження ефектів поширення над морською поверхнею виконувалася реєстрація сигналів супутників під час їхнього заходу за лінію горизонту.

Приймання сигналів ШСЗ «Транзит» здійснювалося на напівхвильовий диполь, установлений на висоті  $h_a = 48$  м над рівнем моря. Як основу вимірювальної установки використовували приймач SMV-8.5, що забезпечував запис рівня сигналу, а також фазоманіпульованої складової, яка містить ефемериди поточного сеансу ШСЗ. Ці записи використовувалися для розрахунку кутомісцевої залежності амплітуди прийнятих сигналів. Тривалість сеансу становила 10...15 хв — від кутів місця 5...10° до заходу супутника. На цьому етапі експериментів візуально спостережуване хвилювання моря перебувало в межах від штилю до 2 балів (легке хвилювання [10]).

Для приймання сигналів GPS використовували приймач ACE-III виробництва фірми Trimble Navigation, виконаний в одному блоці з антеною кругової поляризації Bullett-III, встановленою на висоті  $h_a = 14.4$  м. У цих експериментах тривалість сеансів зазвичай становила 30...60 хвилин у діапазоні кутів місця не менше 20° і до заходу супутника за горизонт. Хвилювання моря, яке візуально спостерігалось в серіях дослідів із GPS, перебувало в межах від штилю до 3 балів (помірне хвилювання [10]).

Основні параметри, що характеризують умови проведення експериментів, наведено в таблиці.

Як випливає з таблиці, кутова швидкість руху супутників «Транзит» на орбіті становить 3.33°/хв, у зв'язку з чим для задовільного відтворення пелюсткової структури і флуктуацій сигналу частоту реєстрування даних обрано 10 Гц. У випадку із супутниками GPS, кутова швидкість руху яких майже на порядок менша, цілком задовільним виявилось менше значення частоти — 1 Гц, що відповідає штатному режиму роботи приймача «ACE-III».

Відносна висота антен  $h_a / \lambda$  для обох систем виявилася практично однаковою, відмінність не перевищувала 20 %.

Параметри, що характеризують умови проведення експериментів

Параметр	Супутник	
	GPS	«Транзит»
Висота орбіти супутника, тис. км	20.2	~1.0
Період обертання супутника, год:хв	11:58	~01:48
Кутова швидкість руху супутника, °/хв	~0.50	~3.33
Тривалість перебування в зоні видимості, год	~5.00	~0.25
Довжина радіохвилі, м	0.19	0.75
Висота приймальної антени, м	14.4	48.0
Відносна висота приймальної антени, $h_a / \lambda$	76	64
Кутовий розмір інтерференційної пелюстки, °	0.38	0.45
Середня тривалість інтерференційної пелюстки, с	45	8
Частота реєстрування даних, Гц	1	10
Деталізація подання даних (приблизна кількість відліків на одну інтерференційну пелюстку)	45	80

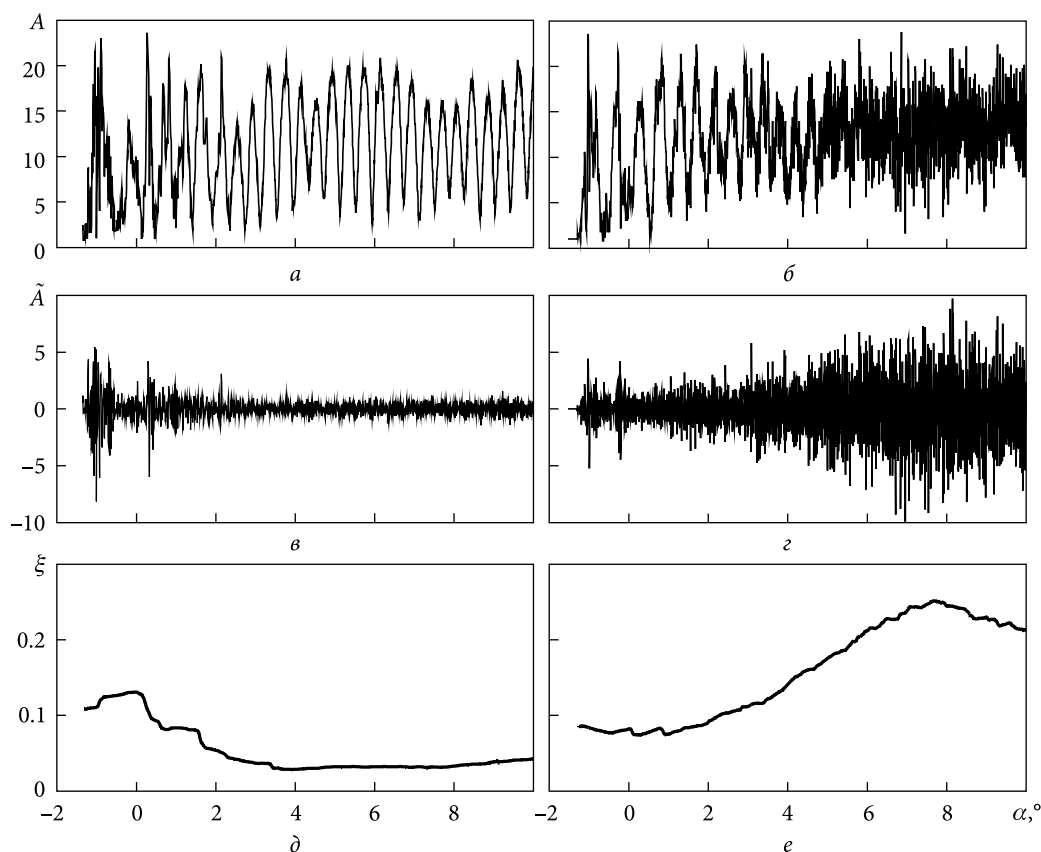


Рис. 3. Приклади опрацювання дослідів із супутниками GPS в умовах штিলю (а, в, д) і помірного хвилювання (б, з, е); а, б — початкові реалізації; в, з — флуктуаційні складові прийнятих сигналів; д, е — відносна інтенсивність флуктуацій  $\xi$

На жаль, у всіх серіях вимірювань із супутниками GPS і «Транзит» супутніх вимірювань морського хвилювання технічними засобами не проводили, оскільки експерименти були спрямовані на дослідження тропосферної рефракції. Було виконано лише порівняння інтегральних характеристик: кореляція між експериментально знайденими значеннями  $\sigma_h$  і швидкістю вітру в період вимірювань (за даними метеостанції, віддаленої на 8 км) становила близько 0.6 [4].

#### 4. Аналіз кутомісцевих залежностей амплітуди прийнятих від супутників сигналів і методика їх обробки

У проведених експериментах сигнали від супутників приймалися в умовах багатопроменевого поширення, пов'язаного з істотним відбиттям радіохвиль від схвильованої морської поверхні. Це проявилось в спостереженні як інтерференційної пелюсткової структури, характерної для

дзеркального відбиття, так і шумоподібної складової, пов'язаної з морським хвилюванням і турбулентними процесами в тропосфері.

Приклади записів супутникових сигналів  $A(\alpha)$ , що були отримані на радіохвилі  $\lambda = 0.19$  м в умовах штিলю і помірного хвилювання, наведені на рис. 3, а і б відповідно. Записи, отримані на радіохвилі  $\lambda = 0.75$  м для подібних умов хвилювання, подано на рис. 4, а, б.

Для обох діапазонів в умовах штিলю закономірно є наявність чіткої пелюсткової структури (рис. 3, а та 4, а). Однак при хвилюванні записи сигналів різних супутників різко відрізняються. На коротшій хвилі  $\lambda = 0.19$  м видно сильну «зашумленість» сигналу (рис. 3, б), що свідчить про значний рівень дифузної компоненти. Водночас на довшій хвилі  $\lambda = 0.75$  м, як за штিলю, так і за легкого хвилювання в діапазоні кутів місця менше ніж  $10^\circ$ , виконувалися умови сильного дзеркального відбиття. Тому флуктуації на пелюстковій структурі супутників «Транзит» в умовах

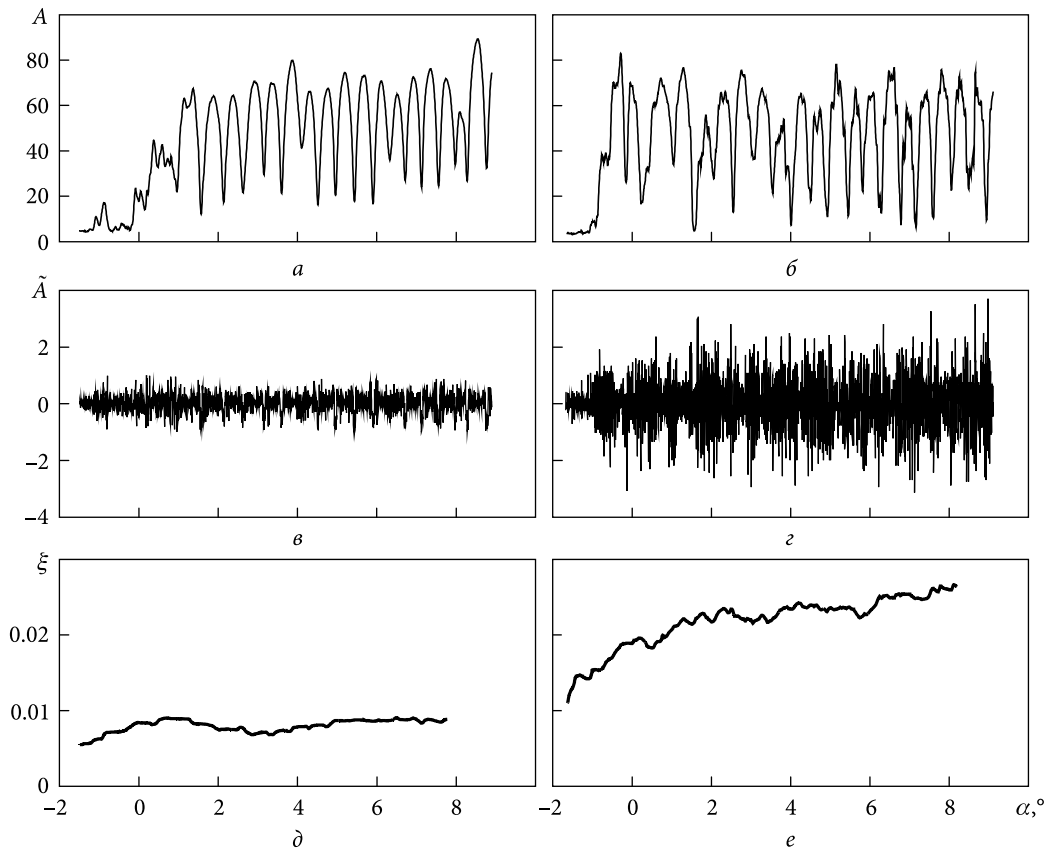


Рис. 4. Приклади опрацювання дослідів із супутниками «Транзит» в умовах штилю (а, в, д) і слабкого хвилювання (б, г, е): а, б — початкові реалізації; в, г — флуктуаційні складові прийнятих сигналів; д, е — відносна інтенсивність флуктуацій  $\xi$

легкого хвилювання були малі (рис. 4, б), а за штилю — майже не спостерігалися (рис. 4, а).

Виділення флуктуаційної складової з повного сигналу проводили за методикою, аналогічною до застосованої в [4]. Розглянемо опрацювання сигналів на прикладі записів, отриманих у досліді із GPS (рис. 3). На першому етапі до початкових реалізацій  $A(\alpha)$  (рис. 3, а, б) застосовували метод ковзного середнього (МКС) на вузькому інтервалі, значно меншому за ширину інтерференційної пелюстки. У результаті виходили згладжені складові, зумовлені переважно інтерференцією прямого і дзеркального сигналів. Віднімання згладжених складових з початкового сигналу дало змогу отримати флуктуаційні компоненти  $\tilde{A}(\alpha)$  (рис. 3, в, г).

На другому етапі обчислювали середнє значення  $\langle A \rangle$  прийнятого сигналу і середньоквадратичне відхилення флуктуацій  $\sqrt{\langle \tilde{A}^2 \rangle}$  у функції кута місця  $\alpha$ . Усереднення виконували

з використанням МКС у досить широкому ковзному вікні, що охоплює кілька інтерференційних пелюсток.

Після нормування отриманих у такий спосіб середньоквадратичних значень флуктуацій на середні значення сигналу отримували відносну інтенсивність флуктуаційної компоненти

$$\xi = \frac{\sqrt{\langle \tilde{A}^2 \rangle}}{\langle A \rangle}. \quad (3)$$

Кутомісцеві залежності  $\xi(\alpha)$  для штилю наведено на рис. 3, д, а для хвилювання — на рис. 3, е. Аналогічне опрацювання було виконано і для супутника «Транзит» (рис. 4).

Отримана в такий спосіб відносна величина флуктуацій сигналу  $\xi$ , що приймається, використовувалася для обчислення коефіцієнта дифузного відбиття  $\rho_d$ . Особливість завдання полягала в тому, що обчислення цього відношення, як було зазначено вище, виконувалося шляхом

усереднення на інтервалі, що охоплює кілька інтерференційних пелюсток. При цьому в межах кожної з них під час руху супутника відбувалася безперервна зміна параметрів розподілу амплітуди прийнятого сигналу, що підпорядковувався закону Райса [11], пов'язана зі зміною фази інтерференції прямого і дзеркального сигналів.

Щоб установити функціональний зв'язок між отриманим значенням  $\xi$  і вимірюваним коефіцієнтом дифузного відбиття  $\rho_d$  у вигляді

$$\rho_d(\xi) = k(\xi) \cdot \xi, \quad (4)$$

ми реалізували алгоритм обчислення коефіцієнта  $k(\xi)$  з використанням комп'ютерного моделювання. Попередньо з використанням згаданої вище феноменологічної моделі поля сигналів було виконано розрахунок залежностей  $\xi(q)$  і  $\rho_d(q)$ . Щоб охопити всі можливі значення детермінованої складової повного сигналу, обчислення для кожного значення параметра шорсткості  $q$  обчислювали в межах однієї інтерференційної пелюстки з використанням такого алгоритму:

- задавалася рівномірна послідовність різниць фаз між прямим сигналом і його дзеркальним відбиттям  $\Delta\varphi = 0, 1, 2, \dots, 359^\circ$ . Для кожної різниці фаз розраховували детерміновану складову повного сигналу і 1000 випадкових незалежних комплексних сигналів, що імітують дифузну компоненту. Квадратурні складові цих сигналів підпорядковувалися нормальному закону розподілу. Розрахунок коефіцієнтів відбиття ( $\rho_s$  — для детермінованої складової,  $\rho_d$  — для випадкової) виконувався з використанням (1) і (2). При цьому параметр  $q$  у межах інтерференційної пелюстки залишався незмінним;

- для кожної різниці фаз  $\Delta\varphi$  виконували по чергове підсумовування детермінованої складової із сигналами дифузних відбитків. У результаті отримували підмасив  $A_\varphi$ , абсолютні значення членів якого за своїм змістом були модельними аналогами вибірок сигналів, які реєструють у натурних експериментах;

- для кожної різниці фаз здійснювалося обчислення підмасиву флуктуаційної складової:  $\tilde{A}_\varphi = A_\varphi - \langle A_\varphi \rangle$ ;

- сукупності всіх підмасивів  $A_\varphi$  і  $\tilde{A}_\varphi$  об'єднувалися в межах інтерференційної пелюстки відповідно в масив амплітуд  $A$  і масив флуктуа-

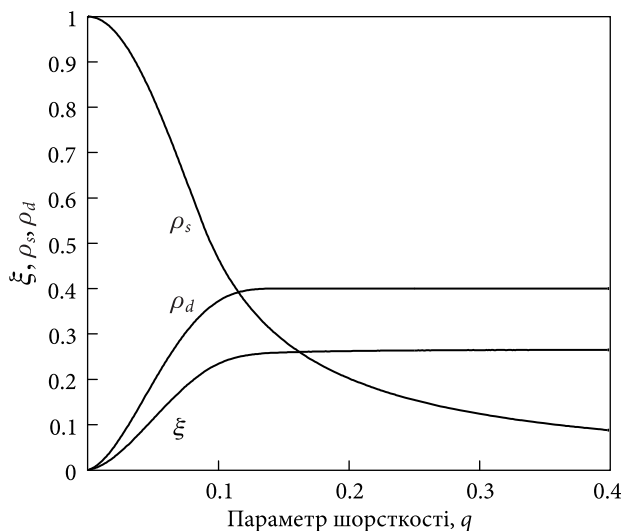


Рис. 5. Графіки залежності коефіцієнтів дзеркального ( $\rho_s$ ) і дифузного ( $\rho_d$ ) відбиття, а також відношення  $\xi$  від параметра шорсткості  $q$

ційних складових  $\tilde{A}$  (у кожному по 360 тисяч членів). Потім за допомогою (3) ці масиви використовувалися для обчислення модельного значення відносних флуктуацій;

- з метою отримання залежності  $\xi(q)$  попередні пункти алгоритму повторювалися для кожного члена заданої послідовності параметра шорсткості  $q$ .

Слід зазначити, що описаний спосіб отримання модельного значення  $\xi$ , по суті, мало відрізняється від способу його отримання під час опрацювання експериментальних даних. Непринципова різниця полягає лише в способі усереднення вхідних даних.

Також потрібно підкреслити, що під час опрацювання експериментальних даних з використанням (3) слід обирати вікно усереднення, яке містить ціле число інтерференційних пелюсток — це підвищить точність порівняння результатів експериментів з моделлю.

На рис. 5 наведено розраховані на підставі феноменологічної моделі поля залежності від параметра шорсткості  $q$  коефіцієнтів дзеркального ( $\rho_s$ ) і дифузного ( $\rho_d$ ) відбиття, а також відношення  $\xi$ .

На підставі розрахункових залежностей  $\rho_d(q)$  і  $\xi_0(q)$ , представлених на рис. 5, не важко перейти до необхідної залежності  $k(\xi)$ . Вона представлена у вигляді графіка на рис. 6 суцільною лінією.



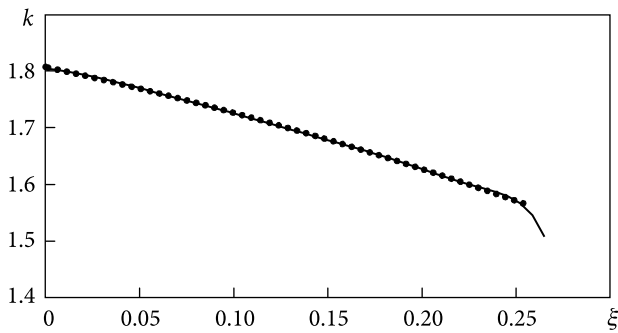


Рис. 6. Графіки залежності коефіцієнта  $k$  від відносного рівня флуктуацій амплітуди сигналу  $\xi$

Під час опрацювання експериментальних даних зручно користуватися апроксимацією цієї залежності поліномом 2-го степеня:

$$k(\xi) = 1.808 - 0.722\xi - 0.906\xi^2, \quad \xi \leq 0.258. \quad (5)$$

Вона представлена на рис. 6 пунктирною лінією.

Слід зауважити, що значення  $\xi > 0.258$  відповідають значенням параметра шорсткості  $q > 0.134$ , за якого коефіцієнт дифузного відбиття досягає максимальної величини  $\rho_d \max = 0.4$ .

З урахуванням вищесказаного коефіцієнт дифузного відбиття за експериментальними даними розраховували з використанням виразів (3)–(5) таким чином:

$$\rho_d = \xi(1.808 - 0.722\xi - 0.906\xi^2), \quad \xi \leq 0.258, \\ \rho_d = 0.4, \quad \xi > 0.258.$$

## 5. Аналіз результатів натурних досліджень

Під час руху супутника GPS до горизонту в міру зменшення кута місця інтенсивність флуктуацій, згідно з критерієм Релея для дифузної компоненти, спочатку падає (особливо це помітно в дослідях із хвилюванням, рис. 3, б, г, е), а потім, за кутів місця, нижчих за  $2\text{--}3^\circ$ , у різних дослідях або сповільнюється (рис. 3, е), або знову зростає (рис. 3, д). Така поведінка флуктуацій на малих кутах місця визначається впливом тропосферної складової. Це відбувається внаслідок того, що в зазначеному діапазоні кутів промінь, що з'єднає супутник і приймач, на значній частині шляху проходить через шари атмосфери з підвищеною турбулентністю. Особливо помітне посилення флуктуацій на малих кутах місця відбувається під час штилю (рис. 3, в, д) у спокійну спекотну

погоду, яка сприяє підвищеній турбулентності приводного шару. Крім загального підйому інтенсивності флуктуацій, у цьому ж діапазоні кутів мають місце також епізодичні короткочасні сплески (рис. 3, в, г), які не пов'язані з інтенсивністю морського хвилювання і характеризують вплив шаруватих неоднорідностей тропосфери поблизу поверхні моря.

У дослідях із супутниками «Транзит» в умовах штилю також спостерігається деяке зростання інтенсивності флуктуацій (рис. 4, в) і їхніх середньоквадратичних значень (рис. 4, д) на малих кутах місця, проте воно менше, ніж в аналогічних експериментах із супутниками GPS (рис. 3, в, д), через майже лінійну залежність інтенсивності тропосферних флуктуацій  $\langle \chi^2 \rangle$  від частоти  $f$ ,  $\langle \chi^2 \rangle \sim k^{7/6}$  [13], де  $k = 2\pi f/c$  — хвильове число,  $c$  — швидкість світла у вільному просторі.

Отримані значення відносної інтенсивності дифузної компоненти в наведених дослідях для кожної із систем відрізняються майже на порядок: у разі хвилювання величина  $\xi$  на хвилі  $\lambda = 0.19$  м досягає значень  $\sim 0.25$  (рис. 3, е), а на хвилі  $\lambda = 0.75$  м — близько  $0.02$  (рис. 4, е). За штилю відмінності також мають місце ( $0.04$  проти  $0.008$ , див. рис. 3, д і 4, д).

На рис. 7 отримані в експериментах графіки залежності коефіцієнта дифузного відбиття від кута місця для штилю (штрихові криві) і для хвилювання (суцільні криві) порівнюються з результатами модельних розрахунків (рис. 2) для радіохвиль  $\lambda = 0.19$  м і  $\lambda = 0.75$  м.

Порівняння експериментальних характеристик з розрахунковими дає можливість визначити ступінь морського хвилювання в конкретному досліді. Так, з графіків на рис. 7, а випливає, що в експерименті з GPS, який відповідає штриховій кривій, хвилювання було  $\sigma_h \approx 0.025$  м, а в експерименті, який відповідає суцільній кривій —  $\sigma_h \approx 0.18$  м, тобто спостерігається достатній контраст між характеристиками під час штилю і хвилювання. Крива, яка представляє результати, що відносяться до сильнішого хвилювання, при  $\alpha > 6\dots 7^\circ$  досягає граничного значення  $0.4$ , за якого вимірювання сили хвилювання не видається можливим. Про подібні характеристики, отримані в експерименті із супутником «Транзит» (рис. 7, б), важливо зауважити, що вони перебувають на самому початку шкали. Отже, така

система, що використовує більш низьку частоту, підходить для дослідження сильнішого хвилювання.

Зауважимо, що на рис. 7, а розрахункові криві починаються не з нуля, а з деякого «п'єдесталу», знайденого в роботі [4] за масивом експериментальних реалізацій GPS. Рівень «п'єдесталу» в даній серії вимірювань становить величину близько 0.04.

Фізичними причинами появи такого «п'єдесталу» можуть бути кілька факторів:

- при наближенні до нульових кутів місця флуктуації, пов'язані з морським хвилюванням, не наближаються до 0, про що було зазначено в експериментальних роботах, наприклад [9, 14];
- «п'єдестал» може формуватися також під впливом тропосферної турбулентності, внаслідок значної протяжності тропосферної ділянки на трасі «супутник — приймальна антена».

Таким чином, результати експериментальних досліджень і модельних розрахунків показують можливість розширення діапазону вимірювання ступеня морського хвилювання за сигналами супутників з використанням для цього характеристик дифузної компоненти в різних частотних діапазонах. Водночас слід зазначити, що наведені результати експериментів і модельний аналіз мають попередній характер. Для ґрунтовного дослідження потрібен ширший експериментальний матеріал із використанням, крім сигналів супутників, також даних одночасних контактних вимірів, до того ж, в умовах інтенсивніших значень морського хвилювання.

Технічне рішення багаточастотних вимірювань можливе в різних варіантах. Наприклад, в одному з варіантів може використовуватися, подібно до того, як розглянуто в цій статті, випромінювання на різних частотах супутників різних систем. Оскільки сеанси спостережень у різних системах, як правило, не збігаються, зіставлення результатів вимірювань, отриманих у сеансах різних систем, має проводитися за усередненими статистичними характеристиками, з урахуванням ступеня стаціонарності морського хвилювання. В іншому випадку може бути застосовано варіант, коли один космічний апарат випромінює одночасно на декількох частотах, які досить сильно відрізняються, що зручно для безпосереднього порівняння характеристик

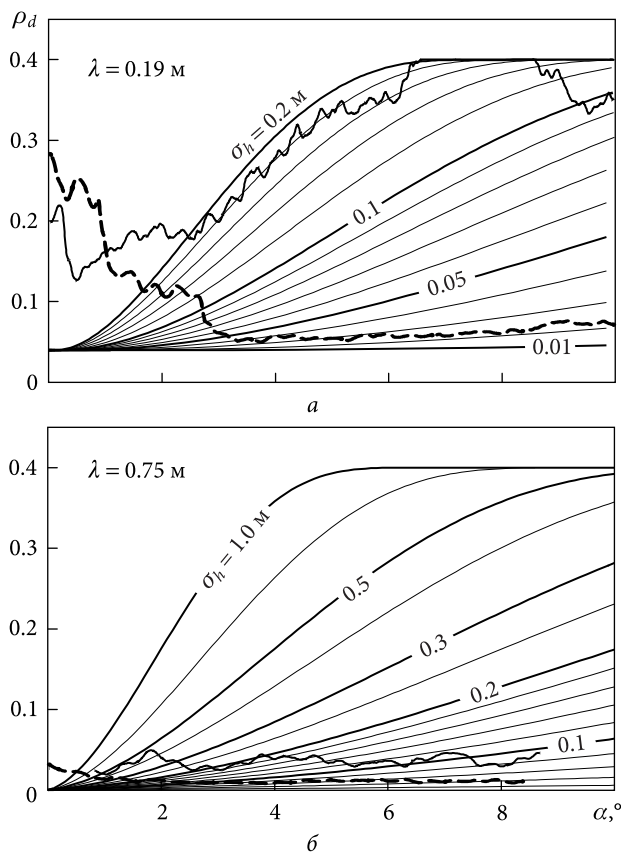


Рис. 7. Порівняння коефіцієнтів дифузного відбиття, отриманих у досліді із супутниками GPS (а) і «Транзит» (б), з модельними розрахунками за умови  $\lambda = 0.19$  м і  $\lambda = 0.75$  м відповідно

дифузних компонент в одному і тому ж сеансі вимірювань. З наявних нині супутників можна обрати ті, що підходять для такого варіанта. До них відносяться, наприклад, метеосупутники NOAA, що випромінюють крім інших частот також такі, які можуть бути використані в даному завданні:  $\sim 137$ ,  $\sim 400$ ,  $\sim 466$ ,  $\sim 1700$  МГц [15]. Зручно також те, що цей тип супутників перебуває на так званих сонячно-синхронних орбітах, що дає можливість спостерігати за станом поверхні моря в заданому районі в один і той самий сонячний час доби.

Крім того, під час вибору системи можна врахувати статистику хвилювання, відповідну до очікуваної в заданому районі, яка наводиться у відповідних довідниках. У районах, де статистичні характеристики хвилювання досить помірні, зручно використовувати випромінювання GPS, а для районів із сильним хвилюванням можуть додатково використовуватися метеороло-

гічні та дослідницькі супутники, які випромінюють у більш низькочастотних діапазонах.

## Висновки

1. Флуктуації прийнятих сигналів, що спостерігалися в проведених експериментах із супутниками GPS і «Транзит», за кутомісцевими характеристиками та інтенсивністю значною мірою відповідають моделі, заснованій на ефекті Релея.

2. Експерименти, проведені із супутниками GPS і «Транзит» в умовах штилю і помірного хвилювання, показують істотну відмінність в інтенсивності дифузної компоненти флуктуацій сигналів, зумовленої морським хвилюванням, у кожній із систем.

3. Обмеження методу діагностики морського хвилювання за сигналами GPS пов'язане з характерним «насиченням» розрахункових характеристик дифузної компоненти при збільшенні ступеня хвилювання. Зазначене насичення може бути зменшене шляхом використання ШСЗ з більш низькочастотним випромінюванням.

4. Для калібрування шкал хвилювання необхідні спільні натурні радіофізичні та контактні вимірювання.

5. Метод може знайти застосування в мережі первинних метеостанцій на березі моря для оперативної оцінки ступеня морського хвилювання в прибережній зоні як додатковий засіб до стандартних метеорологічних вимірювань, а також може використовуватися з корабля.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Пустовойтенко В.В., Запєвалов А.С. *Оперативная океанография: Современное состояние, перспективы и проблемы спутниковой альтиметрии*. Севастополь: Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2012. 218 с.
2. Zavorotny Z.U., Voronovich A.G., Katzberg S.J., Garrison J.L., Komjathy A. Extraction of sea state and wind speed from reflected GPS signals: modeling and aircraft measurements. *IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp.* (IGARSS 2000). Hilton Hawaiian Village, Honolulu Hawaii, USA, 24–28 July 2000. P. 57–59. DOI: 10.1109/IGARSS.2000.857255
3. Jin S., Komjathy A. GNSS reflectometry and remote sensing: new objectives and results. *Adv. Space Res.* 2010. Vol. 46, Iss. 2. P. 111–117. DOI: 10.1016/j.asr.2010.01.014
4. Синицький В.Б. О возможности использования излучения спутников GPS под малыми углами для диагностики морского волнения. *Радиофизика и электроника*. 2010. Т. 15, № 3. С. 58–64. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/105816>
5. Замараєв В.Б., Кабанов В.А., Моргун Г.М., Синицький В.Б. Изменчивость характеристик сигналов GPS, распространяющихся в приземном слое атмосферы. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2004. Т. 9, № 3. С. 541–548.
6. Zamaraev V.B., Kabanov V.A., Morgun G.M., Sinitsky V.B. Variations of the Tropospheric Refraction over the Sea. Simultaneous Measurements at Ground-to-Ground and Satellite-to-Ground Radio Paths. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2006. Vol. 65, Iss. 8. P. 685–689. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v65.i8.10
7. Beard C.I. Coherent and Incoherent Scattering of Microwaves from the Ocean. *IRE Trans. Antennas Propag.* 1961. Vol. 9, Iss. 5. P. 470–483. DOI: 10.1109/TAP.1961.1145043
8. *Радиоокеанографические исследования морского волнения*: сб. статей под ред. С.Я. Брауде. Киев: Изд. АН УССР, 1962. 242 с.
9. Балан М.Г., Беспечный С.Б., Горбач Н.В., Педенко Ю.А., Разказовский В.Б. Статистические характеристики поля сантиметровых и миллиметровых волн над поверхностью моря. *Изв. вузов. Радиофизика*. 1982. Т. 25, № 4. С. 1260–1268.
10. Бартон Д., Вард Г. *Справочник по радиолокационным измерениям*. Пер. с англ. под ред. М.М. Вейсбейна. М.: Сов. радио, 1976. 392 с.
11. Разказовский В.Б., Педенко Ю.А. Модель поля миллиметровых и сантиметровых волн над морем для исследования методов измерения углов места низколетящих целей. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 2003. Т. 8, №1. С. 22–33.
12. Синицький В.Б., Тургенев И.С., Ширманова С.И. Измерение и расчет углов атмосферной рефракции по радиозаходам ИСЗ над морем. *Радиотехника*. Республик. межвед. науч.-техн. сб. Вып. 96. Харьков, 1992. С. 52–60.
13. Татарский В.И. *Распространение волн в турбулентной атмосфере*. М.: Наука, 1967. 548 с.
14. Кулемин Г.П., Разказовский В.Б. *Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами*. Киев: Наукова думка, 1987. 230 с.
15. NOAA-19. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/NOAA-19> (дата звернення: 14.04.2023).

Стаття надійшла 02.09.2023

## REFERENCES

1. Pustovoitenko, V.V., Zapevalov, A.S., 2012. *Operational oceanography: Current state, prospects and problems of satellite altimetry*. Sevastopol: Marine Hydrophysical Institute of NAS of Ukraine Publ. (in Russian).

2. Zavorotny, Z.U., Voronovich, A.G., Katzberg, S.J., Garrison, J.L., Komjathy, A., 2000. Extraction of sea state and wind speed from reflected GPS signals: modeling and aircraft measurements. In: *IGARSS 2000: IEEE 2000 Int. Geoscience and Remote Sensing Symp.*: Proc. Hilton Hawaiian Village, Honolulu Hawaii, USA, 24–28 July 2000, pp. 57–59. DOI: 10.1109/IGARSS.2000.857255
3. Jin, S., Komjathy, A., 2010. GNSS reflectometry and remote sensing: new objectives and results. *Adv. Space Res.*, **46**(2), pp. 111–117. DOI: 10.1016/j.asr.2010.01.014
4. Sinitsky, V.B., 2010. On the possibility of using GPS satellite radiation at low angles to diagnose sea waves. *Radiofiz. Elektron.*, **15**(3), pp. 58–64 (in Russian). Available from: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/105816>.
5. Zamaraev, V.B., Kabanov, V.A., Morgun, G.M., Sinitsky, V.B., 2004. Variability of characteristics of GPS signals propagating in the near water surface layer of atmosphere. In: V.M. Yakovenko, ed. 1999. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **9**(3), pp. 541–548 (in Russian).
6. Zamaraev, V.B., Kabanov, V.A., Morgun, G.M., Sinitsky, V.B., 2006. Variations of the tropospheric refraction over the sea. Simultaneous measurements at ground-to-ground and satellite-to-ground radio paths. *Telecommunications and Radio Engineering*, **65**(8), pp. 685–689. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v65.i8.10
7. Beard, C.I., 1961. Coherent and Incoherent Scattering of Microwaves from the Ocean. *IRE Trans. Antennas Propag.*, **9**(5), pp. 470–483. DOI: 10.1109/TAP.1961.1145043
8. Braude, S.Y. ed., 1962. *Radio-oceanographic studies of sea waves*: collection of articles. Kiev: AS UkrSSR Publ. (in Russian).
9. Balan, M.G., Bespechny, S.B., Gorbach, N.V., Pedenko, Yu.A., Rasskazovsky, V.B., 1982. Statistical characteristics of the field of centimeter and millimeter waves over the sea surface. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Radiofiz.*, **25**(4), pp. 1260–1268 (in Russian).
10. Barton, D.K, Ward, H.G., 1969. *Handbook of radar measurements*. Prentice-Hall.
11. Rasskazovsky, V.B., Pedenko, Yu.A., 2003. Millimeter and centimeter wave field model over the sea to investigate methods for measuring the elevation of low-flying targets. In: V.M. Yakovenko, ed. 2003. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **8**(1), pp. 22–33 (in Russian).
12. Sinitsky, V.B., Tourgenyev, I.S., Shirmanova, S.I., 1992. Measurement and calculation of atmospheric refraction angles from radiosettings of satellite over the sea. In: 2013. *Radiotekhnika*. Republic interdepartmental collection. Kharkiv: NURE Publ. **96**, pp. 52–60 (in Russian).
13. Tatarsky, V.I., 1967. *Wave Propagation in Turbulent Atmosphere*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian).
14. Kulemin, G.P., Rasskazovsky, V.B., 1987. *Scattering of millimeter radio waves by Earth surface at small angles*. Kiev: Naukova dumka Publ. (in Russian).
15. NOAA-19. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/NOAA-19> (access date: 14.04.2023).

Received 02.09.2023

V.B. Zamaraev, Yu.A. Pedenko, V.B. Sinitsky

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

#### SEA WAVE DIAGNOSTICS BY RADIO EMISSIONS FROM ARTIFICIAL EARTH SATELLITES IN DIFFERENT FREQUENCY BANDS

**Subject and Purpose.** The present paper is concerned with sea wave diagnostics by signals from artificial satellites in a bistatic radar scheme using the grazing radio-wave propagation and a diffuse component of the signal reflected off the sea surface. The possibility is considered to expand the range of sea state diagnostics by using satellite emissions in different frequency regions.

**Methods and Methodology.** The research is based on the data of field experiments using over-the-horizon navigation satellites of the first (Transit) and second (GPS) generations. The data processing is by the methods of moving average and moving mean square deviation adopted because of the dynamic character of the experiments given the moving source presence. The sea surface state in a particular experiment is estimated by the diffuse component extracted from the total experimental signal. A comparative analysis of the diffuse component parameters is carried out by computer modeling at various wavelengths, source elevation angles and root-mean-squared wave heights.

**Results.** For both satellite systems GPS and Transit, the experimental results show that in the calm and moderate states of the sea surface, the diffuse component intensity of signal fluctuations caused by sea waves differ significantly and fit in with the model upon the Rayleigh Roughness Criterion. On this basis, an advantage can be taken from the satellite emissions in various frequency ranges to expand the scale of sea state diagnostics. The higher-frequency region therewith offers a more accurate yet more limited scale of the sea state measured. The addition of lower-frequency emissions expands the scale of sea state diagnostics towards the severe states.

**Conclusions.** It has been determined that the range of sea state diagnostics can be expanded by using satellite emissions in different frequency regions.

**Keywords:** sea disturbance, calm, Transit and GPS navigation satellites, ephemeris, Rayleigh parameter, diffuse component, root-mean-square height of sea waves.