

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.110>
УДК 621.396.965.8

Ю.О. Педенко

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна
E-mail: yuriy.pedenko@gmail.com

РАДІОЛОКАЦІЙНЕ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ МІСЦЯ ЦІЛЕЙ МЕТОДОМ ROOT-MUSIC З УРАХУВАННЯМ СФЕРИЧНОСТІ ФАЗОВИХ ФРОНТІВ РАДІОХВИЛЬ

Предмет і мета роботи. У роботі досліджено ефективність методу root-MUSIC при радіолокаційному вимірюванні кутів місця маловисотних цілей над морем з урахуванням сферичності фазового фронту радіохвиль, що приймаються. Мета роботи полягала в тому, щоб з'ясувати можливість та ступінь підвищення точності вимірювань з урахуванням сферичності порівняно з класичним підходом, в основу якого покладено наявність плоского фронту радіохвиль.

Методи і методологія. Дослідження проводилося за допомогою комп'ютерного моделювання. Вивчення ефективності запропонованого способу здійснювалося за різних ступенів хвилювання моря. Це дозволило охопити умови від переважно дзеркального до сильного дифузного відбиття радіохвиль від його поверхні. Також при моделюванні використовувався широкий діапазон відстаней до цілі, розташований у дальній зоні приймальної антенної решітки.

Результати. Запропоновано спосіб урахування сферичності фазового фронту хвиль, що приймаються від цілі. Отримано значення похибок вимірювання кутів місця цілей методом root-MUSIC звичайним способом, тобто на основі гіпотези про наявність плоского фронту хвиль, а також похибок, отриманих з урахуванням його сферичності. Виконано порівняння цих похибок при різних ступенях хвилювання моря та в широкому діапазоні відстаней.

Висновки. Встановлено, що запропонований спосіб урахування сферичності фронту хвиль дозволяє істотно зменшити похибки вимірювання кутів місця маловисотних цілей з використанням методу root-MUSIC.

Ключові слова: root-MUSIC, кут місця, маловисотна цілі, похибки вимірювання, сферичність фазового фронту, багатопроменеве поширення, тепловий шум, моделювання.

Вступ

У роботі [1] ми порівнювали ефективність методу root-MUSIC [2, 3] та моноімпульсного амплітудного сумарно-різницевого методу при вимірюванні кутів місця маловисотної цілі, що рухається на висоті 10 м у широкому діапазоні відстаней від 0.5 до 4.0 км. Було показано, що похибки методу root-MUSIC значно менші за похибки моноімпульсного методу майже по всій

трасі. Виняток становила лише її початкова ділянка, де зі скороченням дистанції спостерігалося монотонне зменшення похибок моноімпульсного методу, тоді як похибки методу root-MUSIC зростали і перевищували перші. У пошуках причини збільшення похибок методу root-MUSIC на цій ділянці було зроблене припущення, що це явище обумовлене збільшенням кривизни фазового фронту хвиль у міру скорочення дистанції.

Ц и т у в а н н я : Педенко Ю.О. Радіолокаційне вимірювання кутів місця цілей методом root-MUSIC з урахуванням сферичності фазових фронтів радіохвиль. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27. № 2. С. 110–120. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.110>
Citation: Pedenko, Yu.O., 2022. Root-MUSIC Measurements of Target Elevation Angles with Account of Radio Wave's Phase Front Sphericity. *Radio Physics and Radio Astronomy*, 27(2), pp. 110–120. <https://doi.org/10.15407/rpra27.02.110>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2022. 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, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Дійсно, однією з умов застосування методу root-MUSIC при вимірюванні кутів приходу є вимога лінійної зміни фази сигналів, що належать до підпростору сигналів, уздовж приймальної решітки. Насправді ця умова виконується достатньою мірою, якщо джерело випромінювання перебуває на відстані, яка значно (у декілька разів) перевищує розмір ближньої зони приймальної антенної решітки. У нашому випадку відрізок траси, що розглядається, розташовувався на відносно невеликому віддаленні від кінця ближньої зони (для апертури антенної решітки 2.5 м і робочої довжини радіохвилі $\lambda = 3.2$ см ближня зона закінчувалася на відстані близько 0.39 км), на якому фазовий фронт хвилі прийнятого від цілі сигналу все ще суттєво відрізнявся від плоского. Так, на дистанції 0.5 км відмінність фази хвилі, що приймається від цілі, на крайньому елементі антенної решітки становила близько 18° щодо гіпотетичної плоскої хвилі, що приходить з того ж напрямку та відстані. Така велика відмінність не могла не позначитися негативно на точності вимірювань.

У зв'язку з вищесказаним у цій роботі було поставлено такі задачі:

- з'ясування можливості підвищення точності вимірювань кута місця маловисотних цілей за рахунок врахування сферичності фазового фронту радіохвиль, що приймаються від них;
- оцінка ефективності врахування сферичності в умовах, що характеризувалися різним ступенем хвилювання моря, широким діапазоном значень апіорного параметра методу root-MUSIC «розмірність простору сигналів», різними відстанями цілі від РЛС, наявністю або відсутністю теплових шумів у приймальних каналах;
- пошук значень параметра «розмірність підпростору сигналів», що забезпечуватимуть найбільшу точність вимірювань за тих чи інших умов, які виконуються з урахуванням сферичності.

1. Методика досліджень

Дослідження виконувалося шляхом комп'ютерного моделювання. Воно проводилося в X -діапазоні радіохвиль (довжина хвилі $\lambda = 3.2$ см) з використанням вертикальної приймальної антенної решітки з апертурою 2.5 м, розміщеної на висоті 12 м над рівнем моря. Ширина діаграми направленості за рівнем половинної потужності $\Theta_{0.5}$,

що формується такою апертурою, становила 1° . В якості імітатора цілі використовувалося точкове джерело монохроматичного випромінювання. Імітатор переміщався на постійній висоті 10 м на відстань від 0.5 до 1.5 км.

Вимірювання кута місця цілі проводилися в певних точках траси, обраних таким чином, щоб докладно простежити зміну похибок вимірювання кута місця в межах кожної інтерференційної пелюстки. Для цього виконувалися дві умови: по-перше, положення точок на трасі розраховувалося так, щоб різниця фаз між прямим і дзеркальним сигналом від точки до точки змінювалася з постійним кроком 20° ; по-друге, забезпечувалося включення до їх числа точок, що відповідають інтерференційним максимумам та мінімумам множника ослаблення. У результаті вимірювання здійснювалися в 180 точках уздовж траси. Кутова висота цілі при цьому змінювалася від $1.14\Theta_{0.5}$ до $0.38\Theta_{0.5}$.

Щоб охопити різні рівні дифузного і дзеркального відбиття, дослідження проводилося при різних ступенях хвилювання моря. Для цього використовувалися середньоквадратичні значення висоти нерівностей морського хвилювання, що були обрані відповідно до даних роботи [4]: $\sigma_h = 0.065$ м (хвилювання 1...2 бали), $\sigma_h = 0.12$ м (близько 2 балів), $\sigma_h = 0.21$ м (2...3 бали) і $\sigma_h = 0.32$ м (3...4 бали). У всіх випадках застосовано рівномірний закон розподілу нахилів нерівностей морської поверхні в межах $0 \dots 0.05$ радіан.

На першому етапі дослідження розраховувалися реалізації поля сигналів у межах апертури приймальної антенної решітки, створюваного прямим сигналом від цілі, а також її дзеркальним та дифузними відбиттями від поверхні моря. Для розрахунків використовувалася модель поля, розроблена нами [5] на основі теорії «блискучої поверхні», викладеної в роботах [6, 7]. Для кожної із 180 точок траси розраховувалося по 2 000 реалізацій поля. Кожна з цих реалізацій $\hat{A} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_{156})$ визначалася в 156 точках апертури приймальної антенної решітки, рознесених з інтервалом $\lambda/2$. За незмінної детермінованої складової поля (прямий сигнал плюс дзеркальне відбиття) відмінність реалізацій одна від одної на конкретній дистанції забезпечувалася за рахунок флуктуацій амплітуди та фази сигналів, що надходили від випадковим чином розта-

шованих уздовж траси елементарних відбивачів, які формували дифузну компоненту поля. Значення випадкових параметрів кожної реалізації генерувалися незалежно як один від одного, так і від значень параметрів попередньої реалізації.

На другому етапі ці реалізації поля використовувалися для формування необхідної кількості просторових виборок сигналів, які призначалися для обчислення кутів місця методом root-MUSIC. Як відомо, використання цього методу передбачає апіорне задання числових значень низки параметрів. Найважливішими є такі: розмірність підпростору сигналів M , кількість просторових виборок прийнятих сигналів K і порядок автокореляційної матриці p , утвореної з цих виборок. Оптимальний добір цих параметрів сприяє зменшенню похибок вимірювань. В умовах, коли завади створюються не тільки тепловими шумами приймальних каналів, але й дифузним відбиттям радіохвиль від поверхні моря, такий вибір є складним завданням. Зокрема, для досягнення високої точності вимірювань доводиться у загальному випадку обирати розмірність підпростору сигналів, що перевищує кількість детермінованих сигналів у кілька разів [8]. У даному дослідженні з метою вивчення впливу цього параметра на точність вимірювань використовувалася великий діапазон його значень: $M = 2 \dots 7$. Такий діапазон було обрано з огляду на те, що менші значення забезпечують кращі результати в умовах переважно дзеркального відбиття радіохвиль від поверхні моря і високих відношень сигнал/шум (ВСШ), а великі — при дифузному відбитті та низькому ВСШ [9]. Параметри K та p певною мірою є похідними від значення параметра M і на підставі робіт [8, 9] були обрані так, щоб забезпечити близьку до максимальної точності вимірювань у широкому діапазоні початкових умов: $K = 26$, $p = 9$.

Для отримання обраного значення K кожна реалізація поля \dot{A} , що містить 156 елементів, розбивалася на 26 груп, які примикають одна до одної і містять по $I = 6$ елементів. Амплітуда сигналу k -ї вибірки ($k = 1, 2, \dots, K$) розраховувалася у вигляді:

$$\dot{U}_k = \sum_{i=1}^I \dot{a}_{ki} G_i, \quad (1)$$

де $\dot{a}_{ki} = \dot{A}_{i+I(k-1)}$ — сигнал на i -му елементі k -ї

групи; I — кількість елементів у групі; G_i — значення апертурної функції на i -му елементі групи. Як апертурна використовувалася функція Хеммінга.

З (1) випливає, що сформовані таким чином вибірки прийнятого сигналу є вихідними сигналами віртуальних антен, рознесених еквідистантно з кроком 3λ (9.6 см) і орієнтованих перпендикулярно площини решітки. Ширина головної пелюстки діаграм направленості цих антен становила 0.49 рад (28°), а рівень бічних пелюсток не перевищував -40 дБ.

Вибірki сигналу, представлені виразом (1), використовувалися для обчислень кута місця без урахування сферичності фронту хвиль, що приймаються. З метою підвищення точності вимірювань у цій роботі запропоновано спосіб урахування сферичності шляхом заміни \dot{U}_k на їх скориговані значення \dot{U}'_k :

$$\dot{U}'_k = \dot{U}_k \exp(-j\xi_k), \quad (2)$$

де ξ_k — різниця фазових набігів реальної сферичної та гіпотетичної плоскої хвиль на шляху від цілі до k -ї антени.

Зважаючи на те, що вертикальний розмір антенної решітки значно менший за відстань до цілі, а напрям приходу сигналу від цілі є близьким до її нормалі, з достатньою для поставленого завдання точністю можна обчислити ξ_k за допомогою виразу:

$$\xi_k \approx \frac{2\pi d_k^2}{\lambda 2D}, \quad (3)$$

де d_k — відстань між центром k -ї антени та центром решітки; D — відстань між ціллю та РЛС (передбачається, що РЛС має вимірювач дальності).

Враховуючи те, що \dot{U}_k є сумою прямого, дзеркального та множини дифузних сигналів, можна стверджувати, що фазова добавка (3) обертає вектори всіх складових на той самий кут ξ_k . Звідси випливає, що разом з прямим сигналом випрямляється і фронт дзеркального сигналу, оскільки радіуси кривизни їх фронтів майже рівні. Що стосується дифузних відбиттів, розподілених у межах протяжної «блисучої поверхні», то для них випрямлення досить сильно виражене лише на ділянці, розташованій з боку цілі,

слабшаючи у міру наближення до РЛС. Проте це не має значення, оскільки дифузні відбиття загалом розглядаються як завада.

Для розрахунку кутів місця при різних сполученнях апіорних параметрів методу root-MUSIC і формул (2) або (1), з якими пов'язано врахування або нехтування сферичністю фазового фронту сигналів, використовувалися одні й ті ж реалізації поля. Такий підхід значно скоротив обсяг обчислень, виконаних на першому етапі, а також підвищив якість порівняння результатів.

Для оцінки впливу теплових шумів приймальних трактів на точність вимірювань були виконані розрахунки як без їх урахування, так і за їх наявності. Потужність шумів задавалася однаковою для кожного з 26 каналів. Відношення сигнал/шум задавалося рівним 26 дБ на відстані 2 км у кожному каналі (потужність сигналу представлялася прямим сигналом від цілі). Комплексні амплітуди шуму в каналах задавалися незалежно як один від одного, так і від реалізації до реалізації поля сигналів.

Як вимірний кут місця з M розв'язків обирали той, що перебував у верхньому напівпросторі і якому відповідала найбільша потужність сигналу [10].

На третьому етапі проводилася статистична обробка отриманих результатів. Також було оцінено точність вимірювань з урахуванням сферичності фазового фронту порівняно з вимірюваннями без її урахування.

2. Результати дослідження

На рис. 1–4 наведено графіки дистанційних залежностей середньоквадратичних похибок вимірювання кута місця цілі $S_\epsilon(D)$ при хвилюваннях моря від 1...2 до 3...4 балів. Пунктирною кривою позначені похибки, отримані без урахування сферичності фазового фронту хвиль, а суцільною — з урахуванням. Крім цих графіків, що відносяться до розмірності підпростору сигналів $M = 2...7$, на рисунках наведені графіки дистанційних залежностей низки параметрів, що допомагають пояснити ці похибки: множника ослаблення $V(D)$; коефіцієнтів дзеркального $\rho_s(D)$ та дифузного $\rho_d(D)$ відбиття; кутової висоти цілі над поверхнею моря $\epsilon_t(D)$. Усі кутові величини нормовані на $\Theta_{0.5}$. У рисунках ліворуч представлені результати, отримані за

відсутності теплових шумів у приймальних каналах ($BCШ = \infty$), а праворуч — за їх наявності ($BCШ = 26$ дБ на дистанції 2 км).

Звернемося до результатів, отриманих за невеликих значень розмірності підпростору сигналів. Спільним для них є те, що урахування сферичності або не приводить до підвищення точності вимірювань, або приводить лише до невеликого її зростання. Останнє зауваження стосується лише умов слабого хвилювання (1...2 бали), коли спостерігається невелике зменшення похибок (до 20...30 %) поблизу інтерференційних екстремумів поля (рис. 1). Зауважимо, що це зменшення сильніше виражене на віддаленій половині траси, де коефіцієнт дзеркального відбиття наближається до максимального значення, а не на ближній, де кривизна фронтів радіохвиль зростає.

Проте становище значно змінюється при $M = 5$. З рис. 1–4 видно, що врахування сферичності у цьому разі приводить до зменшення похибок вимірювання кута місця як при сильному, так і при слабкому хвилюванні моря, а також незалежно від наявності шумів у приймальних каналах.

Розглянемо дані, що стосуються слабого хвилювання моря (рис. 1). У цьому випадку спостерігається низький рівень дифузного відбиття при досить високому рівні дзеркального відбиття, що наближається до максимального на віддаленій половині траси. Звернемося до графіків на рис. 1, а ($BCШ = \infty$). Видно, що за відсутності теплових шумів відбувається монотонне зменшення похибок вимірювання зі збільшенням розмірності підпростору сигналів до $M = 7$, де вони в кілька разів менше, ніж за умови $M = 2$.

З іншого боку, при вимірюваннях без урахування сферичності, починаючи з $M = 5$ відбувається «обвал» точності, що посилюється у міру збільшення розмірності підпростору сигналів. Звідси випливає, що в досліджуваній ситуації з метою отримання найбільшої точності вимірювань слід урахувати сферичність за допомогою виразу (2), супроводжуючи це врахування збільшенням розмірності підпростору сигналів до $M = 6...7$. Такий підхід є особливо ефективним при вимірюваннях поблизу глибоких інтерференційних мінімумів поля (рис. 1, а, $D \approx 1.25$ та 1.50 км).

Положення погіршується за наявності теплових шумів у приймальних каналах. І, хоча при

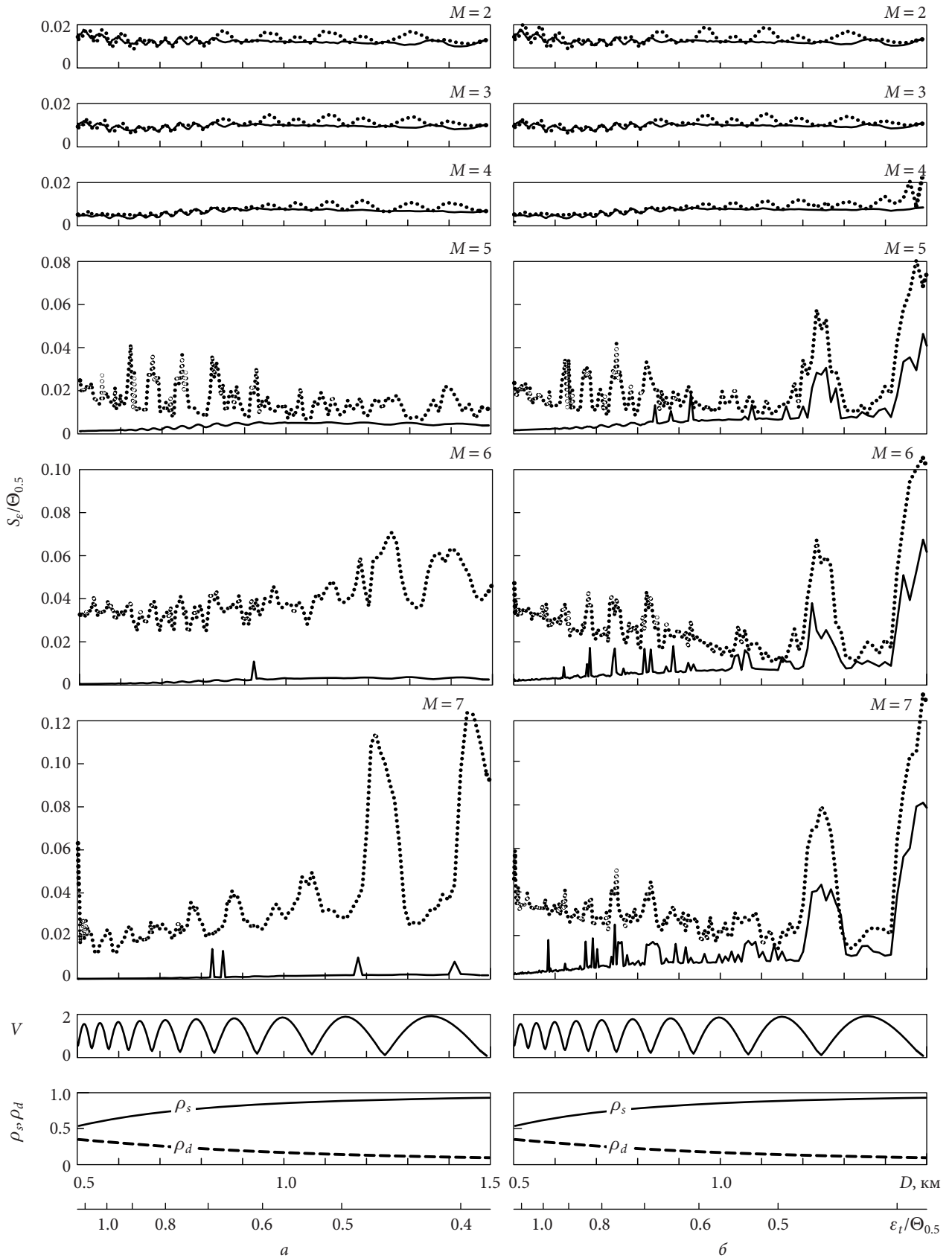


Рис. 1. Дистанційні залежності середньоквадратичних похибок вимірювання кута місця цілі S_ε при хвилюванні моря 1...2 бали ($\sigma_h = 0.065$ м) та допоміжних параметрів V, ρ_s, ρ_d і ε_t за відсутності (а) та наявності (б) теплових шумів

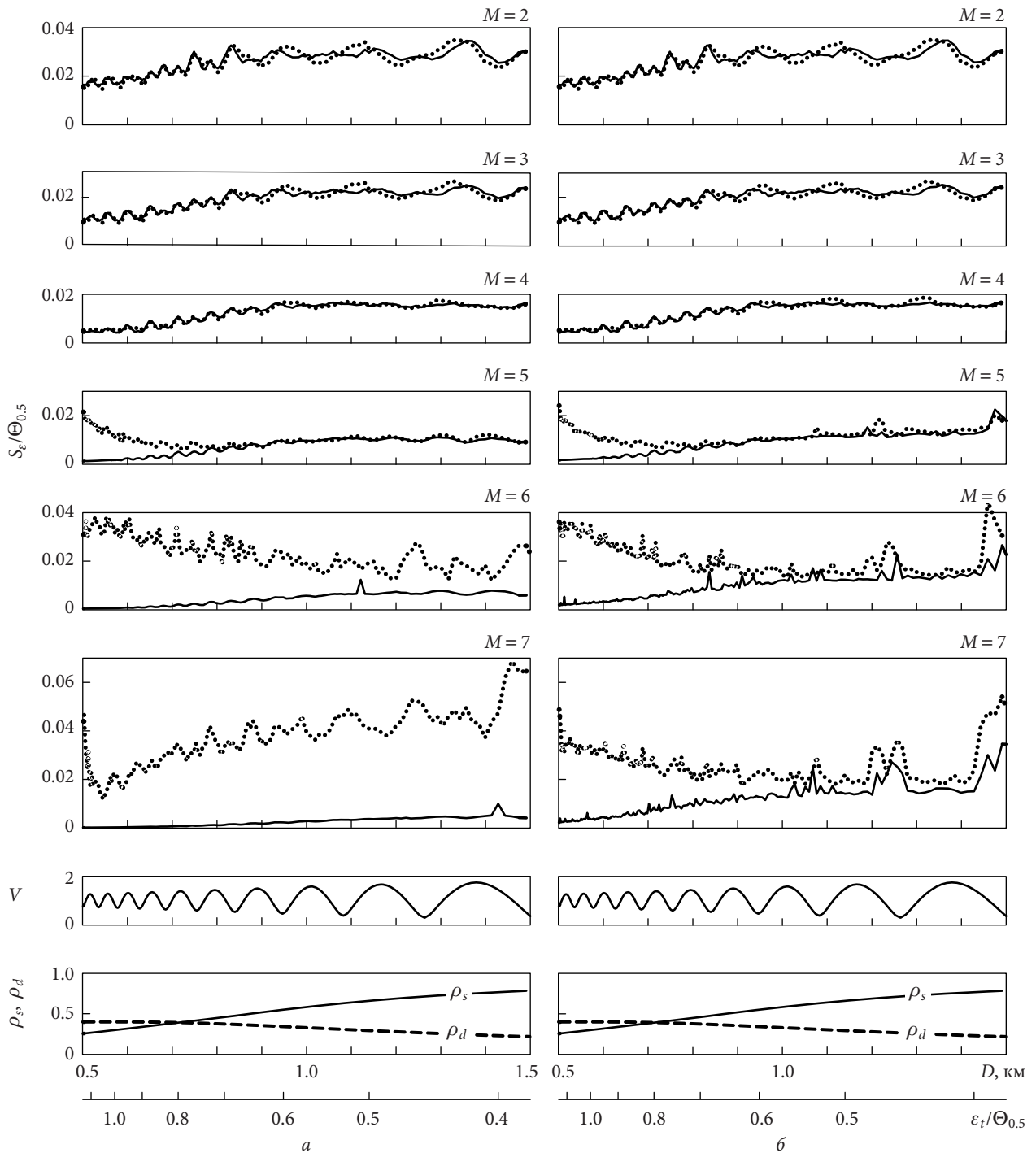


Рис. 2. Дистанційні залежності середньоквадратичних похибок вимірювання кута місця цілі S_e при хвилюванні моря 2 бали ($\sigma_H = 0.12$ м) та допоміжних параметрів V, ρ_s, ρ_d і ε_t за відсутності (а) та наявності (б) теплових шумів

врахуванні сферичності похибки все ж таки менші, ніж без її урахування, вони виявляються неприпустимо великими, особливо в околі глибоких інтерференційних мінімумів поля, що спостерігаються в кінці траси. Використання значень $M = 5$ доцільне лише за відносно низьких

рівнів дзеркального відбиття, властивих меншим відстаням до цілі (див., наприклад, графік $S_e(D)$ на рис. 1, б при $M = 5, D < 0.8$ км).

У результаті, при високому рівні дзеркального відбиття, що супроводжується невеликим дифузним відбиттям та наявністю теплових шу-

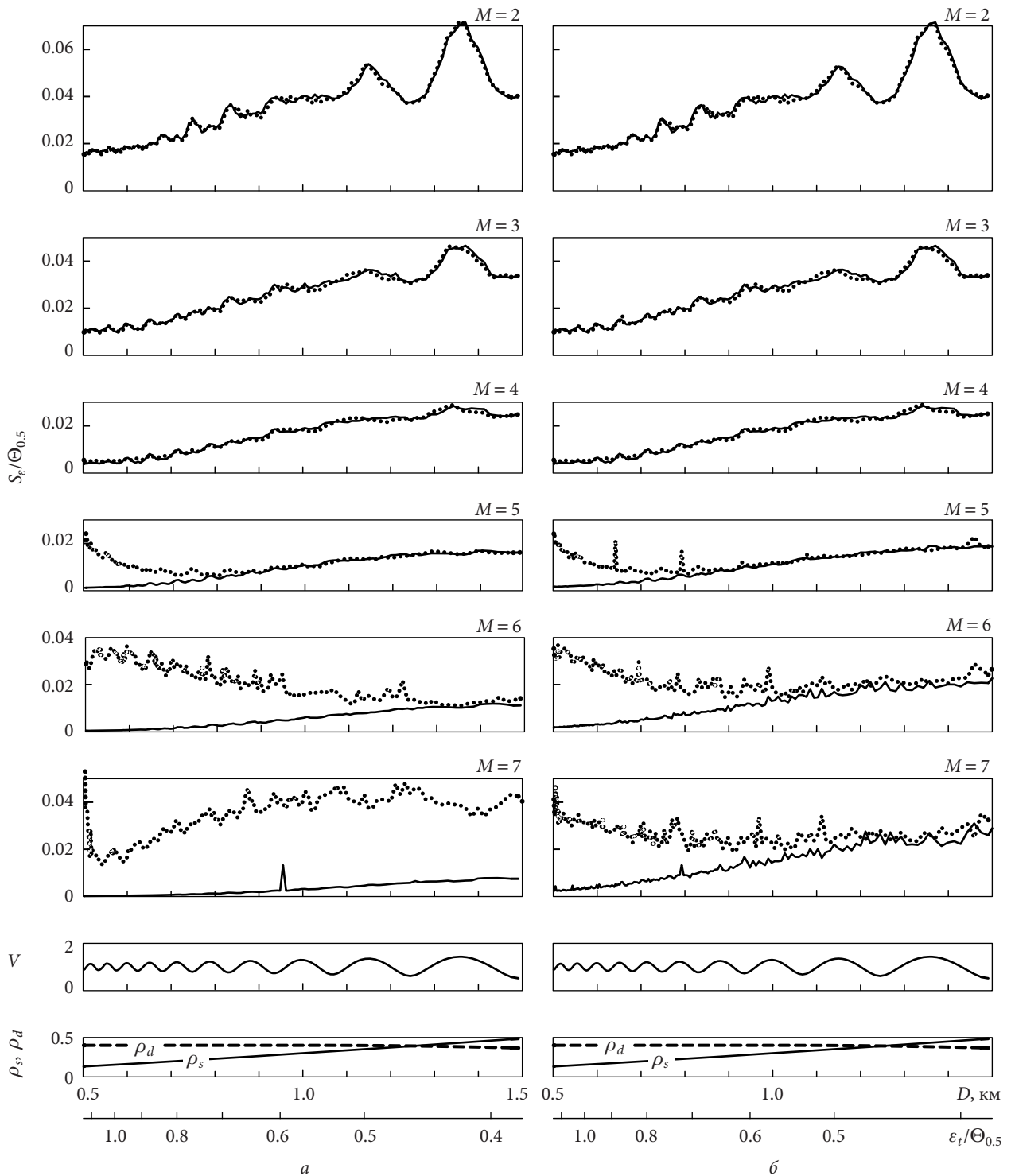


Рис. 3. Дистанційні залежності середньоквадратичних похибок вимірювання кута місця цілі S_ϵ при хвилюванні моря 2...3 бали ($\sigma_h = 0.21$ м) та допоміжних параметрів V, ρ_s, ρ_d і ϵ_t за відсутності (а) та наявності (б) теплових шумів

нів, найменші похибки у широкому діапазоні дальностей до цілі виходять при $M = 4$. Однак при вимірюваннях на малих відстанях урахування сферичності спільно з використанням $M = 5$

приводить до значного підвищення точності вимірювань.

Перейдемо до результатів, отриманих за умов сильного хвилювання (2...3 та 3...4 бали), вико-

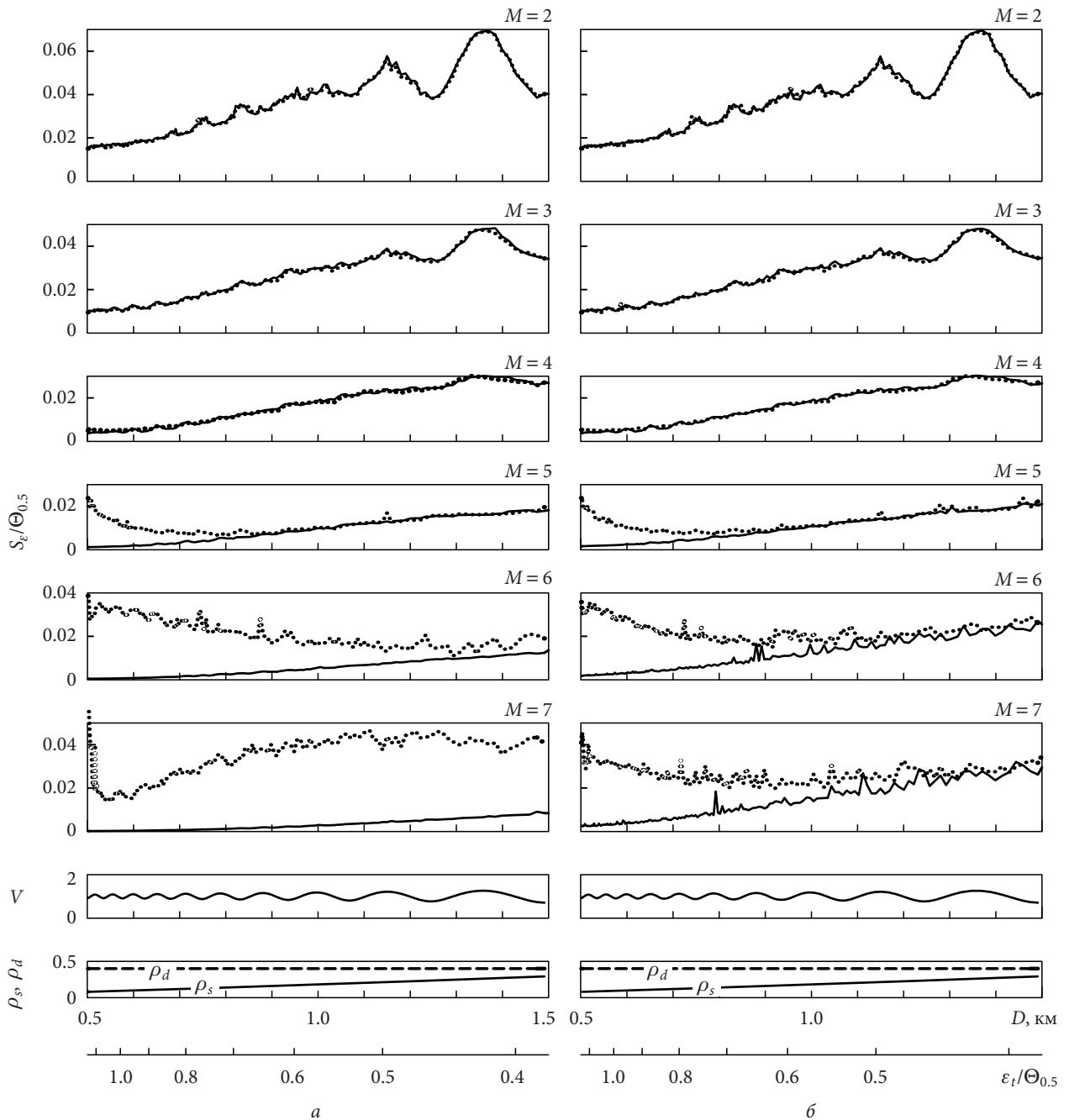


Рис. 4. Дистанційні залежності середньоквадратичних похибок вимірювання кута місця цілі S_ϵ при хвилюванні моря 3...4 бали ($\sigma_h = 0.32$ м) та допоміжних параметрів V, ρ_s, ρ_d і ϵ_t за відсутності (а) та наявності (б) теплових шумів

ристаних у даній роботі (рис. 3, 4). Спільним для них є те, що вони отримані при сильному дифузному відбитті, рівень якого знаходився поблизу максимального значення $\rho_{d\max} \approx 0.4$ [4, 6, 7] по всій трасі від 0.5 до 1.5 км. Рівні дзеркального відбиття при таких хвилюваннях невеликі, проте істотно відрізняються один від одного: якщо в першому випадку $\rho_s = 0.13$ на початку траси та $\rho_s =$

$= 0.45$ на її кінці, то у другому — відповідно $\rho_s = 0.08$ і $\rho_s = 0.30$.

Порівнюючи графіки на рис. 3 і 4, бачимо, що результати моделювання для хвилювання 2...3 та 3...4 бали практично збігаються. При $M > 3$ важко виявити зв'язок похибок з фазою інтерференції прямого та дзеркального сигналу протягом усієї траси. Однак на кінцевій ділянці траси

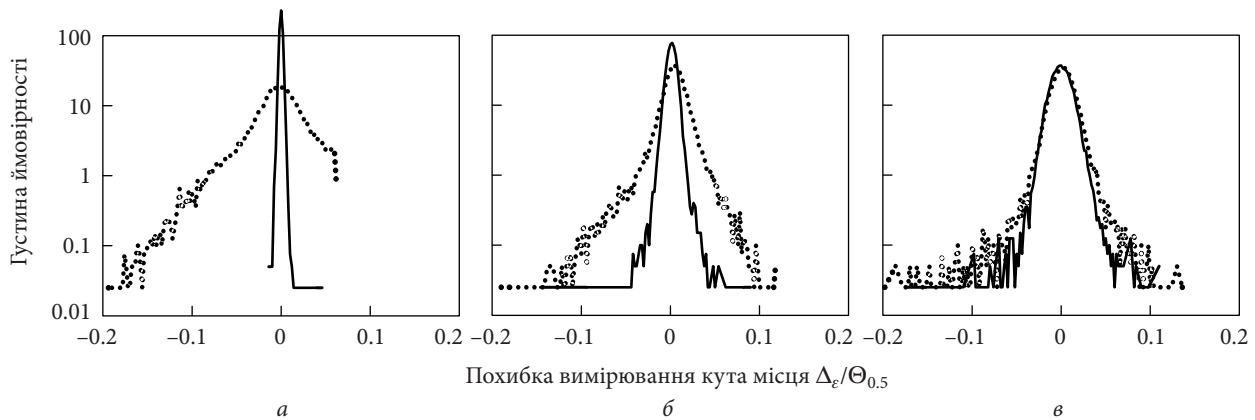


Рис. 5. Розподіл похибок вимірювання кута місця без урахування сферичності (пунктирна крива) та з її врахуванням (суцільна крива): а – $D = 500$ м; б – $D = 750$ м; в – $D = 1000$ м

при кутовій висоті цілі менше $0.5\Theta_{0.5}$ та $M = 2 \dots 3$ спостерігається збільшення середньоквадратичних похибок у максимумі поля та зменшення в мінімумах. Зауважимо, що в цих умовах зв'язок похибок з фазою інтерференції обернений щодо зв'язку, який спостерігався при слабкому хвилюванні моря (рис. 1). Зауважимо, що у перехідному випадку, який представляє результати для проміжного між сильним та слабким хвилюванням (рис. 2), зв'язок похибок практично не залежить від фази інтерференції.

Звернемося до графіків на рис. 3, а та 4, а, отриманих за відсутності теплових шумів. При врахуванні сферичності на них спостерігаються такі самі особливості, що і при слабкому хвилюванні (рис. 1, а) – відбувається неухильне зменшення похибок вимірювання зі зростанням M , включаючи його максимальне використане значення. На більшій частині траси похибки зменшуються у кілька разів, а на її початку – у кілька десятків разів. Якщо ж вимірювання виконуються без урахування сферичності, то настає неприпустимо велике погіршення точності вимірювань. Якщо при $M = 5$ воно проявляється лише на початку траси, то при зростанні розмірності до $M = 7$ охоплює всю трасу. Вочевидь, що з посиленням хвилювання моря і за відсутності теплових шумів урахування сферичності дозволяє використовувати високі значення розмірності підпростору сигналів, включаючи $M = 7$. Усе це разом приводить до суттєвого зменшення середньоквадратичних похибок вимірювань.

Розглянемо вплив теплових шумів на результати вимірювань за умов сильного хвилювання

моря. У цьому випадку похибки вимірювань при врахуванні сферичності дещо зростають у порівнянні з відсутністю шумів. Однак це відбувається лише при значеннях $M = 5$, коли погіршення досягає 2–3 разів. У той самий час похибки вимірювання без урахування сферичності, хоч і зростають меншою мірою, ніж із її урахуванням, все ж перевищують перші, особливо сильно – на першій половині траси.

В умовах помірного хвилювання моря силою 2 бали (рис. 2) рівні дифузного та дзеркального відбиття в середині траси відрізняються від своїх можливих граничних значень, наближаючись до них лише на її кінцях (дзеркальне – вдалині, дифузне – на початку; $0.25 \leq \rho_s \leq 0.79$, $0.40 \geq \rho_d \geq 0.21$). Таке становище позначилося на величині похибок і характері дистанційних залежностей. Останні характеризуються тим, що, хоча викиди похибок і присутні в інтерференційних мінімумах поля, вони все ж таки значно менші, ніж у разі слабого хвилювання.

Розглянемо ситуацію за відсутності теплових шумів (рис. 2, а). Як і у випадках слабого та сильного хвилювання, урахування кривизни фронту хвиль приводить до таких самих результатів – похибки вимірювання стають значно меншими, ніж у випадку звичайних вимірювань, зі зростанням розмірності підпростору сигналів до $M = 7$ включно.

Додавання шумів (рис. 2, б) змінює монотонну залежність похибок вимірювання від параметра M . При збільшенні його значення до $M = 5 \dots 6$ спостерігається зменшення похибок, але потім воно змінюється на їх зростання.

На закінчення проаналізуємо розподіл похибок вимірювання кута місця. На рис. 5 наведено розподіл похибок, представлених на рис. 3, б, для випадку $M = 6$. Результати, отримані без урахування сферичності, представлені пунктирною лінією, а з урахуванням — суцільною. Розподіли отримані на кількох відстанях до цілі, на яких спостерігаються різні ступені точності, що досягаються за допомогою урахування сферичності фронту хвиль. Для більш точної оцінки графіки залежностей представлені в логарифмічному масштабі. З тією ж метою для розрахунку використовувалася досить велика кількість незалежних вимірювань кута місця — по 20 тисяч для кожної кривої.

Аналіз розподілів похибок показує, що їх максимуми практично збігаються з напрямом на ціль як із урахуванням сферичності, так і без нього. Однак отримані в останньому випадку розподіли несиметричні, тут спостерігається більш висока ймовірність похибок в області кутів під ціллю. Поліпшення точності при врахуванні сферичності відбувається переважно за рахунок зменшення дисперсії виміряних значень кутів місця.

Висновки

Виконані дослідження пов'язані з пошуком шляхів підвищення точності радіолокаційних вимірювань кутів місця маловисотних цілей над схвильованою поверхнею моря з використанням методу root-MUSIC. Як один із засобів, що дозволяють вирішити цю проблему, запропонований і випробуваний підхід, при якому береться до уваги сферичність фазового фронту радіохвиль, що надходять від цілі.

Дослідження здійснювалося шляхом комп'ютерного моделювання з використанням різних ступенів хвилювання моря, різних відстаней до цілі, різних апріорних значень розмірності підпростору сигналів, а також за наявності та відсутності теплових шумів приймальних каналів. З метою отримання достовірних оцінок ефективності запропонованого способу виконано порівняння похибок вимірювання кута місця за однакових умов як з урахуванням сферичності, так і без нього.

Отримано такі основні результати.

Запропоновано спосіб «спрямлення» фазового фронту радіохвиль, що приймаються від цілі, якого вимагає класичне використання методу root-MUSIC. У роботі воно реалізується шляхом додавання певних фазових добавок до виборок сигналів, що надходять від приймальної решітки РЛС.

Установлено, що урахування сферичності фазового фронту радіохвиль дозволяє значно підвищити точність вимірювання малих кутів місця у широкому діапазоні хвилювань моря, а також за відсутності та наявності теплових шумів у приймальних каналах РЛС. Величина цього підвищення може досягати декількох разів, а в деяких випадках, до яких відносяться, наприклад, невеликі відстані до цілі або околиці інтерференційних мінімумів поля сигналів, зростати на порядок і більше.

Для кожного з досліджених ступенів хвилювань моря (1...4 бали) визначені значення основного апріорного параметра методу root-MUSIC «розмірність простору сигналів», при яких досягаються найменші похибки вимірювання кута місця.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Pedenko Y., Reznichenko N., Zuykov V. and Labazov S. The Root-MUSIC Method versus the Amplitude Sum-Difference Monopulse Method in Radar Tracking of Low-Elevation Targets over Rough Sea. *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. (Kharkiv, Ukraine, 21–25 Sept. 2020). Kharkiv, 2020. P. 305–308. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252582.
2. Марпл-мл. С.Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения*. Пер. с англ. под ред. И.С. Рыжака. Москва: Мир, 1990. 584 с.
3. Шахтарин Б.И., Ковригин В.А. *Методы спектрального оценивания случайных процессов*. Учебное пособие. Москва: Гелиос АРВ, 2005. 248 с.
4. Бартон Д., Вард Г. *Справочник по радиолокационным измерениям*. Пер. с англ. под ред. М.М. Вейсбейна. Москва: Сов. радио, 1976. 392 с.
5. Разсказовский 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.

6. Вексман Р., Spizzichino А. *The scattering of electromagnetic wave from rough surface*. London: Pergamon press, 1963. 303 p.
7. Бартон Д. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места. *Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон.* 1974. Т. 62, № 6. С. 37–61.
8. Педенко Ю.А. Выбор параметров метода root-MUSIC при радиолокационном измерении углов места целей вблизи поверхности моря. *Радиофизика и электроника*. 2013. Т. 4(18), № 1. С. 53–58.
9. Педенко Ю.А. Радиолокационное измерение углов места маловысотных целей над морем методом root-MUSIC в условиях помех от сигналов многолучевого распространения и тепловых шумов пеленгатора. *Радиофизика та електроніка*. 2016. Т. 7(21), № 1. С. 22–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2016.01.022>.
10. Педенко Ю.А. Измерение углов места целей над морем с использованием метода root-MUSIC. Выбор решения. *Радиофизика и электроника*. 2014. Т. 19, № 4. С. 33–41.

Стаття надійшла 06.12.2021

REFERENCES

1. Pedenko, Y., Reznichenko, N., Zuykov, V. and Labazov, S., 2020. The root-MUSIC method versus the amplitude sum-difference monopulse method in radar tracking of low-elevation targets over rough sea. In: *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW)*. Kharkiv, Ukraine, 21–25 Sept. 2020. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252582.2.
2. Marple, S.L., 1987. *Digital spectral analysis: with applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
3. Shakhhtar, B.I. and Kovrigin, V.A., 2005. *Methods of spectral estimation of random processes: a training manual*. Moscow: Gelios Publ. (in Russian).
4. Barton, D.K. and Ward, H.R., 1969. *Handbook of Radar Measurement*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
5. Razskazovskiy, V.B., Pedenko, Yu.A., 2003. A model for millimeter- and centimeter-waves field over a sea surface designs for investigation the methods for low-flying targets elevation angle measurement. In: V.M. Yakovenko, ed. 2003. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. 8(1), pp. 22–33 (in Russian).
6. Вексман, Р., Spizzichino, А., 1963. *The scattering of electromagnetic wave from rough surface*. London: Pergamon press.
7. Barton, D.K., 1974. Low-Angle Tracking. *Proceedings of the IEEE*, 62(1), pp. 687–704. DOI: <https://doi.org/10.1109/PROC.1974.9509>.
8. Pedenko, Yu.A., 2013. The choice of root-MUSIC parameters for radar measurements of target elevation angles near sea surface. *Radiofiz. Elektron.*, 4(18)(1), pp. 53–58 (in Russian).
9. Pedenko, Yu.A., 2016. Radar elevation angle measurements of low-altitude targets over the sea by root-MUSIC method under interference from multipath and thermal noise of direction finder. *Radiofiz. Elektron.*, 7(21)(1), pp. 22–33 (in Russian).
10. Pedenko, Yu.A., 2014. Measuring places angles over the sea using root-MUSIC method. Choice of solutions. *Radiofiz. Elektron.*, 5(19)(4), pp. 33–41 (in Russian).

Received 06.12.2021

Yu.O. Pedenko

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

ROOT-MUSIC MEASUREMENTS OF TARGET ELEVATION ANGLES
WITH ACCOUNT OF RADIO WAVE'S PHASE FRONT SPHERICITY

Subject and Purpose. The paper is an effectiveness study of the root-MUSIC technique as applied to elevation angle measurements of low-altitude radar targets over the sea, specifically with account of the radio waves' phase front sphericity. The purpose is to find out whether and how much can the measurement accuracy be improved through account of the phase front sphericity, as compared with the classical approach assuming a plane phase front.

Methods and Methodology. The work proceeds from computer simulation, considering a variety of sea roughness levels, and covers a range of radio wave reflection conditions from a nearly specular return to strong diffuse reflection from the sea surface. The simulation involves a wide range of target distances within the far-field region with respect to the receive array.

Results. A new approach has been suggested for taking into account the phase-front sphericity of the radio waves arriving from the target. The level of errors of elevation angle measurements has been estimated and compared with such shown by the conventional root-MUSIC method which assumes a plane phase front for the waves reflected from the target. The comparison concerns a wide range of sea roughness levels and target separations.

Conclusion. It has been established that the proposed version of the root-MUSIC technique which takes wave front sphericity into account can significantly reduce the errors in elevation angle measurements for low-altitude targets.

Keywords: root-MUSIC, elevation angle, low-altitude target, elevation measuring errors, phase front sphericity, multipath, thermal noise, simulation.