

ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ І ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ

WAVE PROPAGATION AND REMOTE SENSING

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra29.04.281>
УДК 621.396.965.8
PACS 02.10.Yn, 02.70.-c, 05.40.Ca, 06.20.Dk, 07.05.Tr, 84.40.-x

Ю.Ф. Логвінов, Ю.О. Педенко, М.Г. Резніченко

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

ПРО ДОСЯЖНУ ВЕРХНЮ МЕЖУ КУТІВ МІСЦЯ ЕФЕКТИВНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ ЦІЛЕЙ НАД МОРЕМ МЕТОДОМ *ROOT-MUSIC*, ЗАБЕЗПЕЧЕНИМ АДЕКВАТНИМИ АПРІОРНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Предмет і мета роботи. У роботі досліджено точність вимірювань кутів місця цілей, розташованих поблизу поверхні схвильованого моря на ділянці від верхньої межі гранично малих їхніх значень до зони вільного простору. Основна частина дослідження стосується вимірювань за допомогою методу *root-MUSIC*, заснованого на аналізі власних значень автокореляційної матриці сигналів, що приймаються від цілі. В тих самих умовах отримано точність вимірювань з використанням амплітудного сумарно-різницевого (моноімпульсного) методу. Мета роботи полягала в тому, щоб визначити верхню межу кутів місця, до якої точність методу *root-MUSIC* перевищує точність вимірювань моноімпульсного методу, і тим самим визначити область його ефективного використання.

Методи та методологія. Дослідження проводилося за допомогою комп'ютерного моделювання вимірювання кутів місця радіопеленгаторами двох типів. Перший із них використовував метод вимірювання *root-MUSIC*, а другий — моноімпульсний метод. Обидва пеленгатори працювали на хвилі 3.2 см і мали однакову апертуру приймальної антени 2.5 м. Моделювання здійснювалося для хвилювань моря від спокійного до значного. Крім завад від моря враховувалися завади, створювані внутрішніми шумами приймальних каналів пеленгаторів. Під час моделювання було розраховано дистанційні залежності похибок вимірювання кутів місця цілі, що рухається на постійній висоті 20.0 м, на дистанції від 2.0 до 0.5 км. Це забезпечувало перекриття кутів місця в діапазоні 0.57...2.28 від ширини сумарної діаграми направленості моноімпульсного пеленгатора.

Результати. За однакових хвилювань моря та з використанням рівних апертур приймальних антен отримано значення похибок вимірювання кутів місця цілей обома методами. Розроблено рекомендації щодо вибору апріорних параметрів методу *root-MUSIC*, що забезпечують високу точність вимірювань у різній завадовій обстановці.

Висновки. Встановлено, що метод *root-MUSIC* має вищу точність вимірювань кутів місця маловисотних цілей над морем порівняно з моноімпульсним методом до кутів місця, які дорівнюють подвоєній ширині сумарної діаграми направленості антени моноімпульсного пеленгатора.

Ключові слова: *root-MUSIC*, моноімпульсний метод, апріорні параметри, кут місця, маловисотна ціль, похибки вимірювання, хвилювання моря, багатопроміневе поширення, тепловий шум, комп'ютерне моделювання.

Цитування: Логвінов Ю.Ф., Педенко Ю.О., Резніченко М.Г. Про досяжну верхню межу кутів місця ефективного пеленгування цілей над морем методом *root-MUSIC*, забезпеченим адекватними апріорними параметрами. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2024. Т. 29. № 4. С. 281–292. <https://doi.org/10.15407/rpra29.04.281>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

Вступ

Існує проблема точного радіолокаційного вимірювання кутів місця цілей поблизу поверхні моря [1–5]. Найгостріше вона стоїть у царині гранично малих кутів $\varepsilon_t < 0.7\Theta_{0.5}$ [1] (ε_t – кут між напрямками на ціль та її проекцію на середній рівень моря, $\Theta_{0.5}$ – ширина діаграми направленості приймальної антени у вертикальній площині). При використанні звичайних методів для супроводу маловисотних цілей за кутом місця, наприклад, амплітудного сумарно-різницевого (моноімпульсного) методу, виникають неприпустимо великі похибки вимірювання кута місця, що призводять навіть до втрати цілі [5].

Пошуки шляхів вирішення цієї проблеми спонукали дослідників звернутися до спеціальних методів визначення кутів координат. В останні десятиліття з'явилися публікації, зокрема [6], що стосуються використання для цієї мети методів спектрального оцінювання, які мають високу роздільну здатність. До них належить і метод *root-MUSIC* [7–9]. Водночас обмежена кількість публікацій, що стосуються його використання для вимірювання кутів місця виключно маловисотних цілей, наприклад, [10–12], є недостатньою для того, щоб:

- оцінити можливості методу не тільки в умовах перешкод, створюваних дзеркальним, але й дифузними відбиттями радіохвиль від поверхні моря;

- обрати апріорні параметри методу, які дають змогу за різних кутів місця цілі реалізувати найвищу точність вимірювань у складних заводних ситуаціях, що характеризуються різними поєднаннями рівнів багатопроменевих відбиттів, згаданих вище, і внутрішніх теплових шумів пеленгатора;

- оцінити область кутів місця доцільного використання методу, тобто область, де точність вимірювань методу *root-MUSIC* перевищує точність звичайних методів, зокрема моноімпульсного.

У наших роботах [13, 14] та ін. доведено високу ефективність методу *root-MUSIC* для вимірювання кутів місця цілей поблизу схвильованої поверхні моря на гранично малих кутах $\varepsilon_t < 0.7\Theta_{0.5}$, а також визначено апріорні параметри, що забезпечують високу точність вимірювань.

Що стосується більш високих кутів місця цілі та пов'язаної з цим практично важливої задачі визначення верхньої межі ефективного застосування методу *root-MUSIC*, слід зазначити, що ці питання поки що не порушувалися у відомих публікаціях. Тому в нашій роботі здійснено спробу оцінити цю верхню межу. Додатковим приводом для розв'язання цієї задачі стало те, що в роботі [15] нами було запропоновано й успішно випробувано спосіб урахування кривизни фазового фронту радіохвиль під час вимірювання кутів місця. Це дало змогу розширити сферу застосування точних вимірювань методом *root-MUSIC* у бік коротших відстаней до цілі та, відповідно, в напрямку вищих кутів цілі місця над поверхнею моря під час руху цілі на постійній висоті.

1. Завдання та методика досліджень

Зважаючи на вищесказане, у цій роботі нами було вирішено такі завдання:

- виконано моделювання вимірювань кутів місця в перехідній зоні, тобто від кутів $\varepsilon_t > 0.7\Theta_{0.5}$ до кутів не менше $2\Theta_{0.5}$, вище за які приймання відбитків від поверхні моря антеною моноімпульсного пеленгатора істотно ослаблене;

- визначено апріорні параметри методу *root-MUSIC*, які забезпечують у цьому діапазоні кутів місця найвищу точність вимірювань при різному ступені хвилювання моря та відношеннях сигнал/шум (S/N) у приймальних каналах;

- для тих самих умов, використовуючи таку ж антенну решітку, що для методу *root-MUSIC*, виконано моделювання вимірювань моноімпульсним методом;

- шляхом порівняння похибок вимірювання в заданому діапазоні визначено верхню межу кутів місця, де метод *root-MUSIC* має перевагу над моноімпульсним методом.

Дослідження проводилося на хвилі $\lambda = 3.2$ см із використанням типової траси, схему якої наведено на рис. 1. Приймання сигналів від цілі здійснювалося з використанням вертикальної приймальної антенної решітки з розкритом 2.5 м, розміщеної на висоті 12.0 м над середнім рівнем моря.

Точковий всеспрямований перевипромінювач, що переміщався на постійній висоті 20.0 м

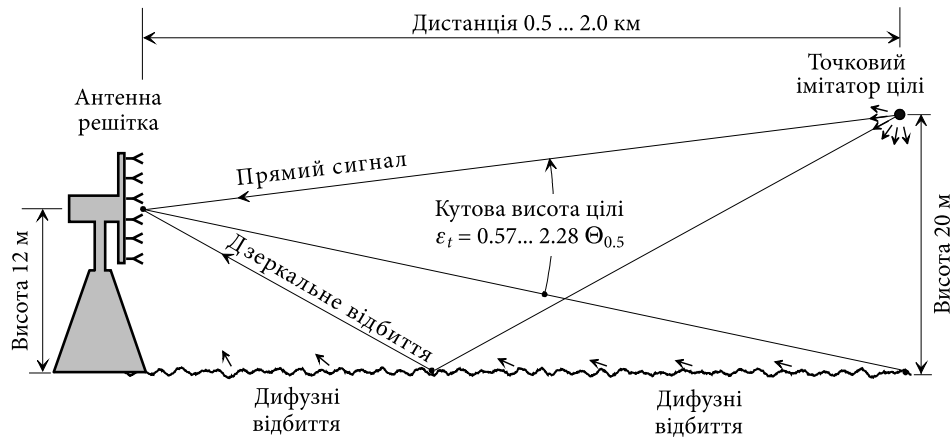


Рис. 1. Схема траси

на відстанях від 2.0 до 0.5 км, використовувався як імітатор цілі. Кут місця цілі при цьому змінювався в діапазоні $0.57...2.28 \Theta_{0.5}$ який з невеликим запасом перекривав необхідний діапазон кутів місця $0.7...2.0 \Theta_{0.5}$.

Дослідження проводилося при різних хвилюваннях моря. Для цього використовувалися середньоквадратичні значення висоти нерівностей поверхні моря, обрані відповідно до даних роботи [16]: $\sigma_h = 0.065$ 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).

Дослідження проводилися в три етапи:

1. Розрахунок амплітудно-фазових структур (АФС) поля сигналів від цілі в розкритті приймальної антенної решітки.
2. Розрахунок кутів місця з використанням даних, отриманих на першому етапі.
3. Статистичне опрацювання результатів вимірювання. Аналіз отриманих результатів і формулювання висновків.

Розрахунок АФС поля сигналів здійснювався з кроком $\lambda/2$ з використанням моделі поля [17], розробленої на базі робіт [1, 18].

Обчислення виконували для кожного із зазначених вище хвилювань у 406 точках по дистанції, які послідовно займав імітатор цілі. Відстані між точками було обрано досить невеликими, щоб надалі була можливість виявити зв'язок похибок вимірювання з фазою інтерференції детермінованих (прямого і дзеркального) сигналів у центрі антенної решітки.

У кожній із 406 точок обчислювали по 2000 незалежних АФС. Незалежність забезпечувалася

за рахунок випадкового розподілу дифузних відбиттів по дистанції та випадкових значень їхніх амплітуди і фази. Водночас детермінована складова структури в конкретній точці, що подається як сума прямого і дзеркального сигналів від цілі, залишалася незмінною.

На другому етапі ті самі АФС поля сигналів використовувалися для обчислення кутів місця як методом *root-MUSIC*, так і моноімпульсним методом. Такий підхід значно скоротив обсяг обчислень, а також дав змогу підвищити якість порівняння похибок вимірювання.

При вимірюваннях моноімпульсним методом визначення кутів місця виконували в режимі стеження, за якого виміряне значення кута місця ототожнювали з напрямком рівносигнальної осі антени пеленгатора, коли обнулялася дійсна частина відношення сигналу різницевого каналу до сигналу сумарного каналу.

На рис. 2 наведено синтезовані діаграми направленості приймальної антени, що використовувалися для вимірювань моноімпульсним методом. Ширина сумарної діаграми направленості за рівнем половинної потужності $\Theta_{0.5}$ становила величину 1° , а рівень її 1-ї бічної пелюстки не перевищував -30 дБ.

Вимірювання кутів місця методом *root-MUSIC* виконувалося з використанням класичного алгоритму, описаного в роботах [8, 9].

Кількість розподілених по апертурі приймальної антенної решітки просторових вибірок прийнятих сигналів і, відповідно, кількість приймальних каналів пеленгатора на підставі [19] було обрано $K = 26$, це значення залишалося

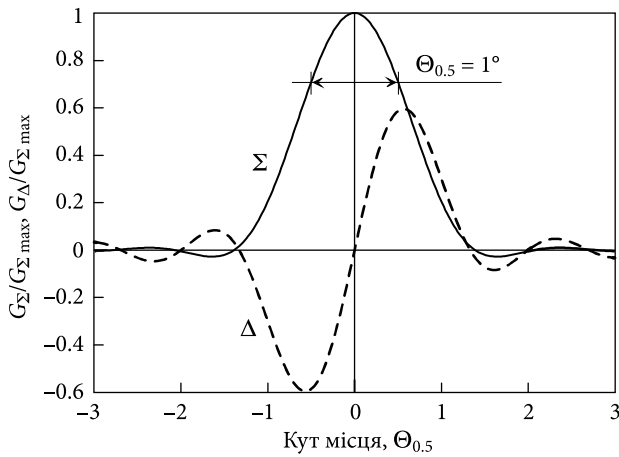


Рис. 2. Нормовані різницева (Δ) і сумарна (Σ) діаграми на-
правленості, синтезовані на основі використовуваної ан-
тенної решітки

ся однаковим для всіх ситуацій, досліджених у цій роботі. Кожну групу вибірок прийнятих сигналів розраховували в 26 еквідистантно розподілених по апертурі антенної решітки віртуальних елементарних антенах [13]. У результаті для кожної з 406 точок дистанції розраховувалося по 2000 груп вибірок прийнятих сигналів від цілі. На підставі [15] з метою підвищення точності вимірювань застосовувалося коригування фази отриманих вибірок, що компенсує сферичність фронту хвилі прийнятих сигналів.

Використання методу *root-MUSIC* передбачає апріорне завдання числових значень низки параметрів, в том числі розмірності підпростору сигналів M і порядку автокореляційної матриці p , утвореної з просторових вибірок прийнятих сигналів. Як показали наші попередні дослідження [13–15], адекватне завдання цих параметрів у тій чи іншій заводській обстановці сприяє зменшенню похибок вимірювань. Щоб визначити значення параметрів, за яких досягається найбільш висока точність вимірювань, у поточній роботі кожену серію вимірювань, що стосується тих самих вхідних умов, було проведено з використанням низки значень $M = 2, 3, \dots, 8$, при цьому з кожним значенням M по чергово використовувалася послідовність значень $p = M, M + 1, \dots, K/2$.

Для оцінки впливу теплових шумів приймальних каналів на точність вимірювань було виконано розрахунки як без їхнього врахування, так і за їхньої наявності. Середня потужність шумів задавалася однаковою для кожного з 26 каналів.

Відношення потужності прямого сигналу від цілі до потужності шумів у кожному каналі (S/N) на максимальній відстані $D_{\max} = 2$ км задавалося рівним 10, 20...50 і ∞ дБ. Беручи до уваги те, що використовувався активний режим пеленгатора, відношення сигнал/шум на менших дистанціях зростало на величину $40 \lg(D_{\max}/D)$ (дБ) щодо максимальної відстані. У результаті на мінімальній дистанції $D_{\min} = 0.5$ км збільшення становило 24 дБ відносно дальності $D_{\max} = 2.0$ км. Комплексні амплітуди шуму в каналах задавалися незалежно як один від одного, так і для кожної з груп просторових вибірок.

У результаті обробки кожної групи вибірок виходило M рішень, кожне з яких містило потужність сигналу та кут його приходу. Вимірне значення кута місця цілі в даному дослідженні отожнювалося з кутом приходу найпотужнішого сигналу з верхнього півпростору.

На третьому етапі проводилося статистичне опрацювання результатів дослідження. При цьому було отримано дистанційні залежності середніх значень похибок $\Delta\epsilon$, їхніх середньоквадратичних відхилень σ_ϵ , а також середньоквадратичних похибок $S_\epsilon = \sqrt{\overline{\Delta\epsilon^2} + \sigma_\epsilon^2}$ як для методу *root-MUSIC*, так і для моноімпульсного методу.

З використанням цих результатів для кожного поєднання хвилювання моря та рівня шумів приймальних каналів було обрано пару апріорних параметрів M і p , що задовольняє отриманню максимальної точності вимірювань. Потім виконували порівняння похибок методу *root-MUSIC*, отриманих з використанням цих пар параметрів, з похибками моноімпульсного методу в усьому діапазоні використовуваних кутів місця цілі. Це дало можливість визначити область кутів ефективного використання методу *root-MUSIC*.

2. Результати дослідження

Аналіз результатів дослідження почнемо з випадку $S/N = \infty$, коли похибки вимірювання створюються винятково відбиттями радіохвиль від морської поверхні. Він дає змогу оцінити максимальні досяжні точності вимірювання кутів місця цілей за різних ступенів хвилювання морської поверхні, різних відстаней до цілі та в широкому діапазоні кутів місця. У цьому випадку

виявлено, що найменші похибки вимірювання реалізуються за найменших значень порядку автокореляційної матриці, тобто при $p = M$. Ця закономірність дотримується для всіх досліджених хвилювань моря ($\sigma_h = 0.065 \dots 0.32$ м) і дистанцій. Як приклад на рис. 3 наведено дистанційні залежності середньоквадратичних похибок за різних апріорних значень порядку автокореляційної матриці p для трьох окремих випадків. Графіки на рис. 3, а і б відповідають хвилюванню моря 1...2 бали ($\sigma_h = 0.065$ м), а на рис. 3, в – 3...4 бали ($\sigma_h = 0.32$ м). Жирними лініями позначено залежності, розраховані для $p = M$. Видно, що в усіх трьох випадках мінімальні похибки отримано саме за такого вибору значення порядку автокореляційної матриці, незважаючи на істотну відмінність початкових умов.

При виборі розмірності підпростору сигналів $M = 2$ спостерігається протилежна закономірність, вона проявляється в тому, що похибки вимірювання зменшуються зі зростанням параметра p . Про це свідчать дані, наведені на рис. 4, а і б, отримані за сильно відмінних хвилювань моря.

Що стосується вимірювань за умови $M = 3$, то в цьому разі залежність від параметра p виражена слабкою мірою.

Визначено також, що похибки вимірювання зменшуються зі збільшенням розмірності підпростору сигналів M . Ця закономірність зберігається в усьому діапазоні досліджуваних кутів місця цілі та хвилювань моря. Як ілюстрацію сказаного на рис. 5 наведено дистанційні похибки вимірювання кута місця за різних хвилювань моря та значень параметрів $p = M = 3 \dots 7$. Оскільки ці залежності отримано при $p = M$, то вони відображають мінімальні похибки, які можна отримати за відсутності шумів приймальних каналів.

Крім цих графіків на рис. 5 наведено дистанційні залежності коефіцієнтів дзеркального $\rho_s(D)$ і дифузного $\rho_d(D)$ відбиття, які допомагають осмислити похибки вимірювань як у цьому випадку, так і на наступних графіках, що належать до тих самих хвилювань моря.

Слід, однак, зазначити, що безперешкодне збільшення параметра M можливо лише до деякого порогового значення, вище якого вимірювання стають нестабільними. Нестабільність проявляється у виникненні випадкових викидів

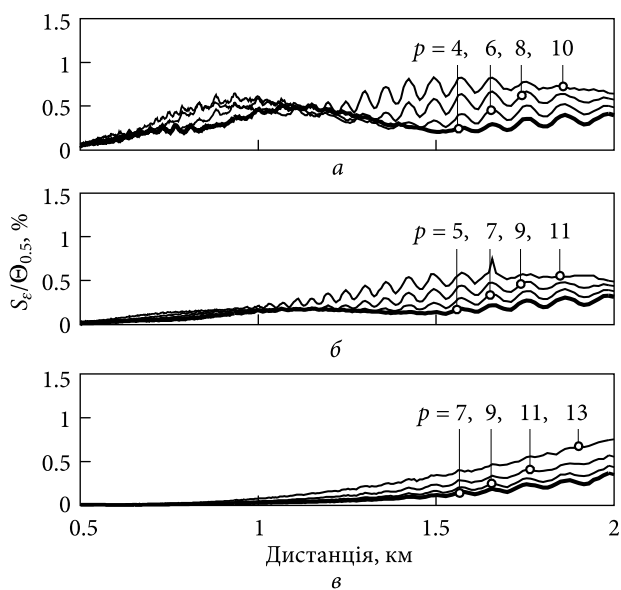


Рис. 3. Дистанційні залежності середньоквадратичних похибок вимірювання кута місця за $M \geq 4$, $S/N = \infty$: а – $\sigma_h = 0.065$ м, $M = 4$; б – $\sigma_h = 0.065$ м, $M = 5$; в – $\sigma_h = 0.32$ м, $M = 7$

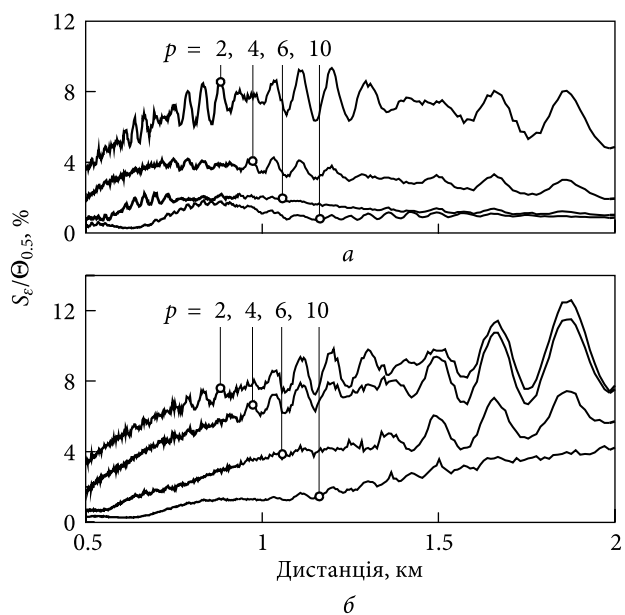


Рис. 4. Дистанційні залежності середньоквадратичних похибок вимірювання кута місця за $M = 2$, $S/N = \infty$: а – $\sigma_h = 0.065$ м; б – $\sigma_h = 0.32$ м

похибок, імовірність яких зростає з подальшим збільшенням M . Виявлено також, що це порогове значення тим вище, чим сильніше хвилювання моря. Так, за $\sigma_h = 0.065$ м вимірювання стабільні, якщо $M \leq 6$, за $\sigma_h = 0.12$ м і $\sigma_h = 0.21$ м – $M \leq 7$, а за $\sigma_h = 0.32$ м – $M \leq 8$.

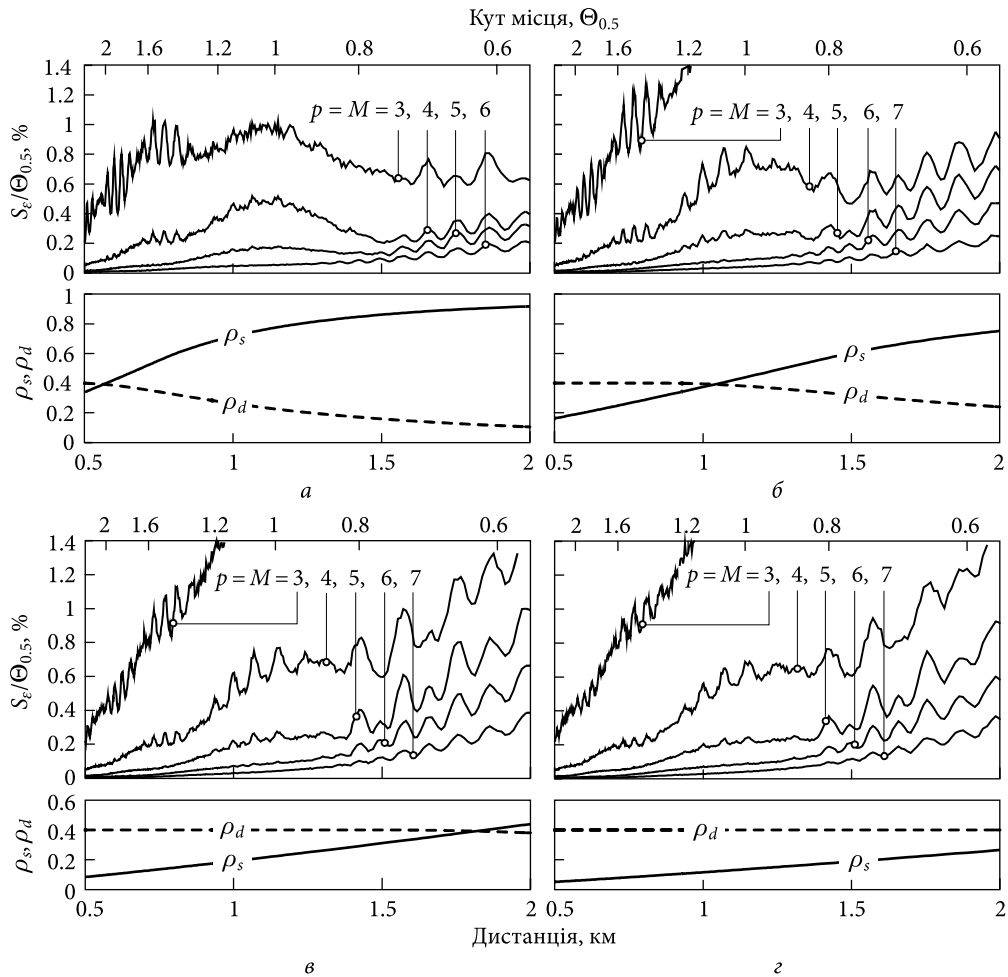


Рис. 5. Мінімально досяжні середньоквадратичні похибки вимірювання кута місця (тобто отримані для $p = M$; $S/N = \infty$) за різних значень розмірності підпростору сигналів і хвилювань моря: а - $\sigma_h = 0.065$ м; б - $\sigma_h = 0.12$ м; в - $\sigma_h = 0.21$ м; г - $\sigma_h = 0.32$ м

Із графіків на рис. 5 видно, що збільшення хвилювання призводить до зростання похибок вимірювання, у тому числі й мінімальних. Зростання зумовлено виключно збільшенням дифузного відбиття. Такий висновок випливає з порівняння результатів, наведених на рис. 5, в і г. Ці результати отримано за однакового рівня дифузійного відбиття, що досяг свого максимального значення ($\rho_{d\max} = 0.4$). Внаслідок цього похибки вимірювання кута місця, наведені на них, практично однакові, незважаючи на те, що рівні дзеркального відбиття відрізняються майже вдвічі. Незалежність похибок від рівня дзеркального відбиття можна пояснити тим, що в досліджуваній ділянці кутів місця різниця між напрямками на ціль і її дзеркальне відбиття досить велика, оскільки перевищує величину $\Theta_{0.5}$.

Розглянемо результати, отримані в умовах завад, створюваних одночасно відбиттями від поверхні моря та внутрішніми шумами приймальних каналів пеленгатора. Вони докорінно відрізняються від розглянутих вище. Насамперед втрачає силу твердження про те, що мінімальні похибки реалізуються за виконання умови $p = M$. Навіть невеликі шуми ($S/N = 50$ дБ) призводять до того, що для досягнення мінімальних похибок доводиться значно збільшувати порядок кореляційної матриці вхідних сигналів. Мало того, використання $p = M$ у більшості випадків спричиняє похибки вимірювання, що значно перевищують похибки за будь-якого $p > M$. У цьому можна переконатися, порівнюючи, наприклад, результати, наведені раніше на рис. 3, б ($S/N = \infty$), з результатами на рис. 6 ($S/N = 20$ і 50 дБ), отриманими в умовах завад.

маними в обох випадках при $\sigma_h = 0.32$ м и $M = 7$. Якщо в першому випадку найвища точність досягається за $p = M = 7$, то в другому випадку вибір такого значення призводить до багаторазового збільшення похибок порівняно з вибором будь-якого $p > M$ не тільки за досить високого рівня шумів ($S/N = 20$ дБ), а й за слабких шумів ($S/N = 50$ дБ).

Зі сказаного вище випливає висновок про те, що для досягнення максимальної точності вимірювань за наявності шумів важливо зробити адекватний вибір поєднань параметрів M і p . Підставою для цього можуть слугувати результати аналізу похибок вимірювань, виконаного за всім обсягом результатів моделювання, отриманих у цій роботі. Їх зображено на рис. 7 у вигляді стовпчастих діаграм. Кожен кластер на діаграмах відноситься до відповідної заводої ситуації, що визначається відношенням сигнал/шум і ступенем хвилювання моря. Він містить два стовпчики — лівий (затемнений) демонструє значення M , а правий — p . Кожне з цих поєднань M і p обрано за результатами опрацювання 63 дистанційних залежностей $S_e(D)$, які отримано за всіх сполучень параметрів $M = 2 \dots 8$ та $p = M \dots 13$. Критерієм вибору було отримання найвищої точності вимірювань для кожної заводої ситуації.

Щоб пояснити отримані результати, додатково було виконано моделювання вимірювань у гіпотетичній ситуації, яка характеризується повною відсутністю хвилювання моря ($\sigma_h = 0$), що має наслідком $\rho_s = 1$ і $\rho_d = 0$. У цьому разі завади створюються виключно некорельованими шумами приймальних каналів, що відповідає вимогам, покладеним в основу методу root-MUSIC [7–9].

Моделювання показало, що в цьому випадку задовільні вимірювання можна реалізувати лише за розмірності підпростору сигналів $M = 2$, яка дорівнює кількості детермінованих сигналів (прямого і дзеркального). Результати моделювання для окремого випадку ($M = 2$ та $S/N = 20$ дБ) показано на рис. 8, а. На ньому видно, що зі зростанням параметра p похибки вимірювання зменшуються, досягаючи мінімальних значень при $p = 10 \dots 12$. Важливим результатом є й те, що похибки вимірювання практично не залежать від фази інтерференції прямого і дзеркального сигналів, незважаючи на збіжні значення їхніх амплітуд.

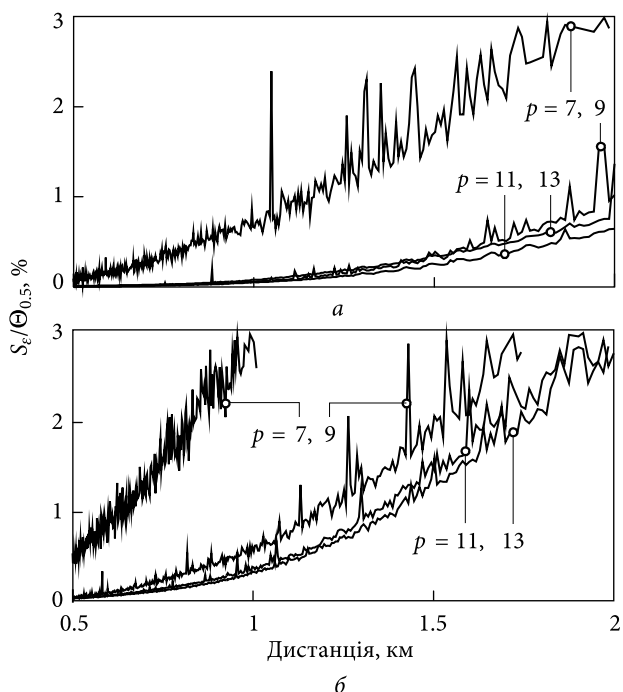


Рис. 6. Дистанційні залежності середньоквадратичних похибок вимірювання кута місця при $\sigma_h = 0.32$ м, $M = 7$ за різних апріорних значень порядку автокореляційної матриці та наявності теплових шумів: а — $S/N = 50$ дБ; б — $S/N = 20$ дБ

Однак використання будь-яких значень $M > 2$ виявилось неприйнятним внаслідок неприпустимо великих похибок вимірювання в околах інтерференційних екстремумів прямого і дзеркального сигналів у центрі приймальної решітки навіть за відносно слабких шумів приймальних каналів. Так, на рис. 8, б наведено похибки вимірювання для $M = 3$, $S/N = 50$ дБ і $p = 6$ (це значення параметра p обрано з діапазону $p = 2 \dots 13$ за ознакою найменших похибок вимірювання, отриманих під час моделювання). Із рис. 8, б видно, що за кутової висоти імітатора понад $0.75\Theta_{0.5}$ на околах інтерференційних мінімумів (позначені точками на верхній осі абсцис) похибки нехтовно малі, проте на околах максимумів вони на порядок перевищують похибки, отримані за $M = 2$.

У результаті аналізу описаних вище результатів визначено, як залежать похибки вимірювання від апріорних параметрів M і p окремо для кожного з двох видів завод — завод, що створюються винятково багатопроменевим поширенням (рис. 5), і завод, що створюються тепловими шумами приймальних каналів (рис. 8) і дзеркальним відбиттям. З'ясувалося, що для отримання

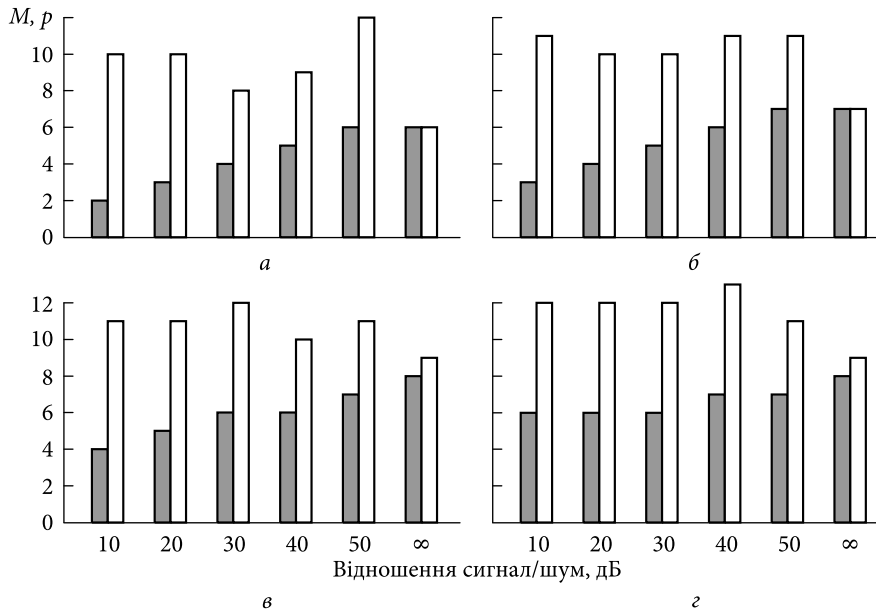


Рис. 7. Поєднання апріорних параметрів M і p , що забезпечують максимальну точність вимірювань кута місця у відповідній завадовій ситуації: а – $\sigma_h = 0.065$ м; б – $\sigma_h = 0.12$ м; в – $\sigma_h = 0.21$ м; г – $\sigma_h = 0.32$ м

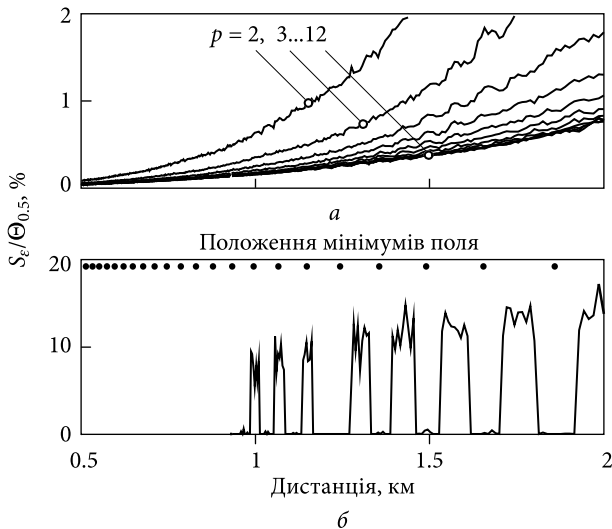


Рис. 8. Похибки вимірювання кута місця над ідеально рівною поверхнею моря: а – $M = 2, p = 2 \dots 12$; б – $M = 3, p = 6$

максимальної точності вимірювань у кожному з цих крайніх випадків до вибору параметрів M і p висуваються полярні вимоги. У першому з них необхідно використовувати якомога більше значення параметра M ($M = 6 \dots 8$) за мінімального значення параметра p ($p = M$), а в другому – мінімальне значення $M = 2$, що дорівнює кількості детермінованих сигналів, за максимально можливого значення параметра p ($p = 10 \dots 13$).

З огляду на те, що в реальних умовах обидва види перешкод присутні одночасно, можна припустити, що найменші похибки можуть бути отримані при використанні проміжних значень параметрів M і p . Як видно з діаграм на рис. 7, головним чином це стосується параметра M . З них випливає, що зі зростанням шумів найбільша точність реалізується за дедалі менших значень цього параметра. Ступінь цієї залежності зростає зі зменшенням дифузного відбиття. Особливо це помітно за слабого хвилювання, коли спостерігається знижений рівень дифузного відбиття. Так, за висоти хвиль $\sigma_h = 0.065$ м і $S/N = 10$ дБ найбільша точність реалізується за $M = 2$ і $p = 11$ (рис. 7, а), що узгоджується з вимогами до цих параметрів під час вимірювань над абсолютно рівною поверхнею (рис. 8).

Що стосується параметра p , то в реальних умовах слід відмовитися від використання його значень, близьких до значення параметра M , а тим паче – від $p = M$, яке забезпечує максимальну точність лише в ідеальному випадку, коли $S/N = \infty$. Невиконання останньої вимоги може призвести до неприпустимо великих похибок навіть за мінімальних шумів (див. рис. 6). Як видно з діаграм, наведених на рис. 7, практично за будь-яких хвилювань моря і шумів приймаль-

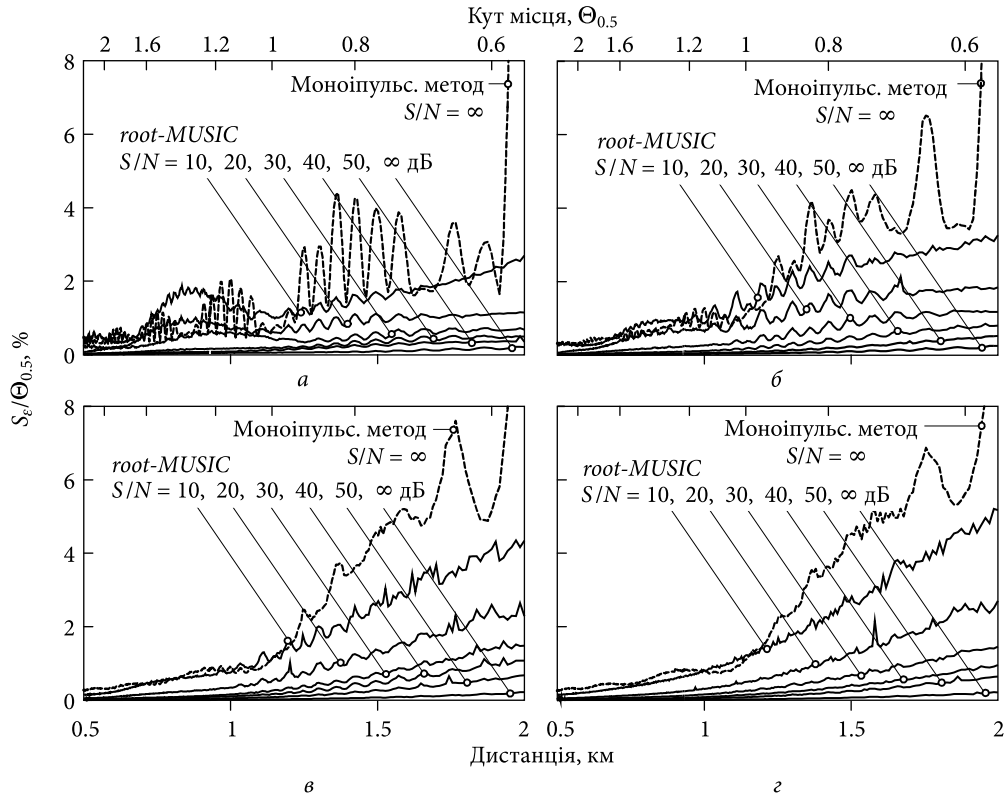


Рис. 9. Похибки вимірювань кута місця моноімпульсним методом (штрихова лінія) і *root-MUSIC* (суцільні лінії): а – $\sigma_h = 0.065$ м; б – $\sigma_h = 0.12$ м; в – $\sigma_h = 0.21$ м; г – $\sigma_h = 0.32$ м

них каналів адекватні значення слід обирати з діапазону $p = 10 \dots 13$.

На рис. 9 наведено графіки дистанційних залежностей похибок вимірювання, отриманих методом *root-MUSIC* за різних хвилювань моря та внутрішніх шумів приймальних каналів (суцільні криві). Ці залежності отримано за використання сполучень параметрів M і p , наведених на рис. 7, що забезпечують максимальну точність вимірювань. На тих самих графіках наведено дистанційні залежності похибок вимірювання кутів місця, отримані моноімпульсним методом (пунктирні криві). Ці залежності отримано без урахування внутрішніх шумів різницевого й сумарного каналів, тому похибки вимірювання, зображені ними, слід вважати мінімально можливими для цього методу.

З рисунка видно, що показані на ньому залежності, які належать до методу *root-MUSIC*, практично монотонно зростають зі збільшенням відстані до цілі. Спостерігається лише несуттєва залежність похибок від фази інтерференції прямого і дзеркального сигналів за слабких хвилю-

вань моря. Дані на рис. 9 дають змогу зробити висновок про те, що метод *root-MUSIC* має суттєву перевагу за точністю вимірювань при кутах місця цілі $0.6 \dots 1 \Theta_{0.5}$ в усьому діапазоні відношень сигнал/шум, використаному в цьому дослідженні. За вищих кутів місця метод *root-MUSIC* зберігає свою перевагу, якщо $S/N \geq 20$ дБ. І лише за $S/N = 10$ дБ точність обох методів стає порівнянною.

Насамкінець слід звернути увагу на те, що на наведених вище рисунках похибки вимірювання кутів місця показано їхніми середньоквадратичними значеннями, це не дає змоги повною мірою оцінити потенційні переваги методу *root-MUSIC*. Допомогти цьому можуть наведені на рис. 10 і 11 дистанційні залежності середніх значень похибок $\Delta\varepsilon$ та їхніх середньоквадратичних відхилень σ_ε . Ці залежності отримано для двох ступенів хвилювання моря – $\sigma_h = 0.065$ м і $\sigma_h = 0.32$ м. Похибки моноімпульсного методу отримано при $S/N = \infty$, а методу *root-MUSIC* при $S/N = 20$ дБ. Видно, що середні похибки методу *root-MUSIC* істотно менші за середні похибки моноімпульс-

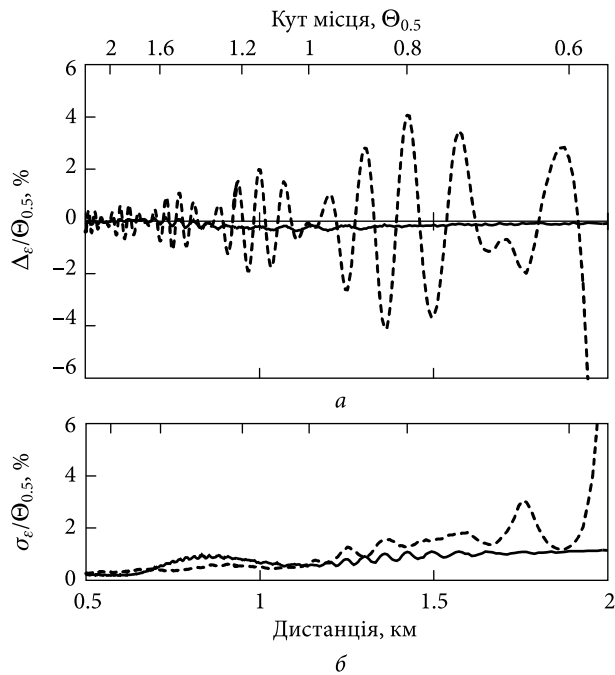


Рис. 10. Дистанційні залежності похибок вимірювання кута місця при хвилюванні моря 1...2 бали: *a* — середні значення похибок; *б* — середньоквадратичні відхилення похибок; суцільна лінія — метод *root-MUSIC*; пунктир — моноімпульсний метод

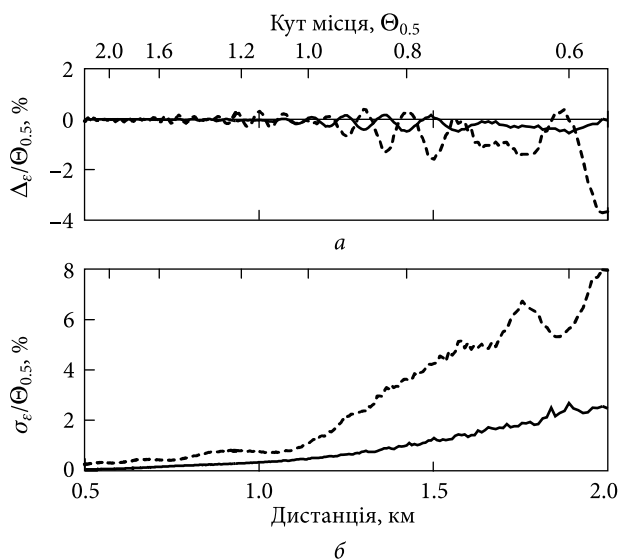


Рис. 11. Дистанційні залежності похибок вимірювання кута місця за хвилювання моря 3...4 бали: *a* — середні значення похибок; *б* — середньоквадратичні відхилення похибок; суцільна лінія — метод *root-MUSIC*; пунктир — моноімпульсний метод

ного методу, особливо в околах інтерференційних екстремумів поля прийнятих сигналів. За можливості усереднення за кількома моментальними незалежними вимірюваннями це дає змогу

ще більше підвищити точність вимірювань методом *root-MUSIC*, порівнюючи з моноімпульсним методом.

Висновки

Шляхом комп'ютерного моделювання досліджено похибки радіолокаційного вимірювання кутів місця цілей у перехідній області кутів місця. Ця область простягається від верхньої межі гранично малих кутових висот цілі ($0.6 \dots 0.7 \Theta_{0.5}$) до зони вільного простору ($2.0 \dots 2.2 \Theta_{0.5}$). Вивчення проводилося шляхом порівняння методу *root-MUSIC* і широко використовуваного амплітудного сумарного-різницевого (моноімпульсного) методу в умовах завад, які створюють багатопроменеві відбиття від поверхні схвильованого моря та теплові шуми приймальних каналів пеленгатора. Для реалізації обох методів використовувався однаковий вертикальний розмір антенних систем, а також ідентичні характеристики морського хвилювання та геометрія траси.

Основні результати дослідження:

- встановлено, що в діапазоні кутів $0.6 \dots 1 \Theta_{0.5}$ метод *root-MUSIC* забезпечує значно вищу точність вимірювань порівняно з моноімпульсним методом, похибки вимірювань якого тут виявляються неприпустимо великими;
- у діапазоні кутів $1 \dots 2 \Theta_{0.5}$ обидва методи демонструють значне зниження похибок вимірювання за збереження переваги методу *root-MUSIC* у широкому діапазоні відношень сигнал/шум;
- встановлено, що при слабкому хвилюванні моря ($\sigma_h = 0.065$ м), яке характеризується низьким рівнем дифузного відбиття, з метою підвищення точності вимірювань слід обирати розмірність підпростору сигналів у діапазоні $M = 2, 3 \dots 6$. Зі збільшенням хвилювання діапазон вибору звужується та зміщується в бік більших значень, насамперед за рахунок збільшення лівої межі цього діапазону. Так, при $\sigma_h = 0.32$ м, що вирізняється максимальним дифузним відбиттям, слід використовувати значення $M = 5, 6 \dots 7$. Незалежно від ступеня хвилювання моря, менші значення M слід використовувати за високого рівня шумів у приймальних каналах, збільшуючи їх у міру зростання S/N ;
- значення порядку p кореляційних матриць, складених із сигналів, що надходять по K при-

ймальних каналах, слід обирати з діапазону $p = 1/3 \dots 1/2K$ за будь-якого ступеня хвилювання моря та рівня шумів приймальних каналів. При цьому слід уникати значень $p = M$, прийнятних лише в малоїмовірному випадку відсутності шумів у приймальних каналах.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бартон Д. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места. *Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон.* 1974. Т. 62, № 6. С. 37–61.
2. White W.D. Low-Angle Radar Tracking in the Presence of Multipath. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 1974. Vol. 10, Iss. 6. P. 835–852. DOI: 10.1109/TAES.1974.307892
3. Dax P.R. Keep track of that low-flying attack. *Microwaves.* 1976. Vol. 15, Iss. 4. P. 36–53.
4. Mrstik A.V., Smith P.G. Multipath Limitations on Low-Angle Radar Tracking. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* 1978. Vol. 14, Iss 1. P. 85–102. DOI: 10.1109/TAES.1978.308582
5. Sherman S.M., Barton D.K. *Monopulse Principles and Techniques*. 2nd edition. Artech House, Incorporated, 2011. 418 p.
6. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения. *Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон.* 1982. Т. 70, № 6. С. 126–139.
7. Марпл-мл. С.Л. *Цифровой спектральный анализ и его приложения*. Пер. с англ. под ред. И.С. Рыжака. Москва: Мир, 1990. 584 с.
8. Van Trees H.L. *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. John Wiley & Sons, Inc., 2002. 1433 p.
9. Шахтарин Б.И., Ковригин В.А. *Методы спектрального оценивания случайных процессов*. Учеб. пособие. Москва: Гелиос АРВ, 2005. 248 с.
10. Howell R.K. d-MUSIC, a real time algorithm for estimating the DOA of coherent sources using a single array snapshot. *1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP99)*: Proc. Phoenix, AZ, USA, 15–19 March 1999. IEEE, 1999. P. 2881–2884. DOI: 10.1109/ICASSP.1999.761364
11. Hwang H.K., Zekeriya A., Marshall G., Yakovlev A. Direction of Arrival Estimation using a Root-MUSIC Algorithm. *Proc. of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2008*. Hong Kong, 19–21 March 2008. Vol. 2. P. 1507–1510. URL: https://www.iaeng.org/publication/IMECS2008/IMECS2008_pp1507-1510.pdf
12. Xuebing Han, Hao Zhang, Huadong Meng, Xiqin Wang. Hybrid Method of DOA Estimation for Low-angle Target Tracking. *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*. Wuhan, China, 25–27 June 2010. IEEE, 2010. P. 4688–4690. DOI: 10.1109/ICECE.2010.1135
13. 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. *Радиофізика та електроніка*. 2016. Т. 7(21), № 1. С. 22–33. DOI: 10.15407/rej2016.01.022.
14. 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)*: proc. Kharkiv, Ukraine, 21–25 Sept. 2020. Kharkiv, 2020. P. 305–308. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252582
15. Педенко Ю.О. Радиолокаційне вимірювання кутів місця цілей методом *root-MUSIC* з урахуванням сферичності фазових фронтів радіохвиль. *Радиофізика і радіоастрономія*. 2022. Т. 27, № 2. С. 110–120. DOI: 10.15407/rpra27.02.110
16. Бартон Д., Вард Г. *Справочник по радиолокационным измерениям*. Пер. с англ. под ред. М.М. Вейсбейна. Москва: Сов. радио, 1976. 392 с.
17. Разсказовский В.Б., Педенко Ю.А. Модель поля миллиметровых и сантиметровых волн над морем для исследования методов измерения углов места низколетящих целей. *Радиофізика і електроніка: сб. науч. тр. Ин-т радиофізики і електрон. НАН України*. Харьков, 2003. Т. 8, № 1. С. 22–33.
18. Beskman P., Spizzichino A. *The scattering of electromagnetic wave from rough surface*. London: Pergamon Press, 1963. 503 p.
19. Педенко Ю.А. Выбор параметров метода *root-MUSIC* при радиолокационном измерении углов места целей вблизи поверхности моря. *Радиофізика і електрон.* 2013. Т. 4(18), № 1. С. 53–58. Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/105963>

Стаття надійшла 07.05.2024

REFERENCES

1. Barton, D.K., 1974. Low-Angle Tracking. *Proc. IEEE*, **62**(1), pp. 687–704. DOI: 10.1109/PROC.1974.9509
2. White, W.D., 1974. Low-Angle Radar Tracking in the Presence of Multipath. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, **10**(6), pp. 835–852. DOI: 10.1109/TAES.1974.307892
3. Dax, P.R., 1976. Keep Track of that Low-Flying Attack. *Microwaves*, **15**(4), pp. 36–53.
4. Mrstik, A.V., and Smith, P.G., 1978. Multipath Limitations on Low-Angle Radar Tracking. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, **14**(1), pp. 85–102. DOI: 10.1109/TAES.1978.308582
5. Sherman, S.M., Barton, D.K., 2011. *Monopulse Principles and Techniques*. 2nd edition. Artech House, Incorporated.
6. Johnson, D.H., 1982. The Application of Spectral Estimation Methods in Bearing Estimation Problems. *Proc. IEEE*, **70**, pp. 1018–1028.

7. Marple, S.L., 1987. *Digital spectral analysis: with applications*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
8. Van Trees, H.L., 2002. *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*. John Wiley & Sons, Inc.
9. Shakhtarin, B.I., and Kovrigin, V.A., 2005. *Methods of spectral estimation of random processes: a training manual*. Moscow: Gelios Publ. (in Russian).
10. Howell, R.K., 1999. d-MUSIC, a real time algorithm for estimating the DOA of coherent sources using a single array snapshot. In: *1999 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP99)*: Proc. Phoenix, AZ, USA, 15–19 March 1999. IEEE, 1999, pp. 2881–2884. DOI: 10.1109/ICASSP.1999.761364
11. Hwang H.K., Zekeriya A., Marshall G., Yakovlev A., 2008. Direction of Arrival Estimation Using a Root-MUSIC Algorithm. In: *Proc. of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2008*. Hong Kong, 19–21 March 2008, 2, pp. 1507–1510. URL: https://www.iaeng.org/publication/IMECS2008/IMECS2008_pp15071510.pdf
12. Xuebing Han, Hao Zhang, Huadong Meng, and Xiqin Wang, 2010. Hybrid Method of DOA Estimation for Low-angle Target Tracking. In: *2010 International Conference on Electrical and Control Engineering*. Wuhan, China, 25–27 June 2010. IEEE, 2010, pp. 4688–4690. DOI: 10.1109/iCECE.2010.1135
13. 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. *Telecommunications and Radio Engineering*, 75(10), pp. 895–907. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i10.40
14. 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*. Kharkiv, Ukraine, 21–25 Sept. 2020. IEEE, 2020. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252582.
15. Pedenko, Y.O., 2022. Root-MUSIC measurements of target elevation angles with account of radio wave's phase front sphericity. *Radio Phys. Radio Astron.*, 27(2), pp. 110–122 (in Ukrainian). DOI: 10.15407/rpra27.02.110
16. Barton, D.K., and Ward, H.R., 1969. *Handbook of Radar Measurement*. Prentice-Hall.
17. 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).
18. Beckman, P., and Spizzichino, A., 1963. *The scattering of electromagnetic wave from rough surface*. London: Pergamon Press.
19. Pedenko, Yu.A., 2013. The choice of root-MUSIC parameters for radar measurements of target elevation near sea surface. *Telecommunications and Radio Engineering*, 72(14), pp. 1279–1287. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i14.20

Received 07.05.2024

Yu.F. Logvinov, Yu.A. Pedenko, N.G. Reznichenko

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

ON THE ACHIEVABLE UPPER LIMIT OF THE ELEVATION
ANGLES OF EFFECTIVE DIRECTION FINDING OF TARGETS OVER THE SEA
BY THE ROOT-MUSIC METHOD PROVIDED WITH ADEQUATE A PRIORI PARAMETERS

Subject and Purpose. The paper investigates the accuracy of measurements of the elevation angles of targets located near the surface of a disturbed sea in the area from the upper limit of their extremely small values to the free space zone. The main part of the study concerns measurements using the *root-MUSIC* method based on the analysis of the eigenvalues of the autocorrelation matrix of signals received from the target. Under the same conditions, the accuracy of measurements using the amplitude sum-difference (monopulse) method was obtained. The purpose of the work was to determine the upper limit of the location angles up to which the accuracy of the *root-MUSIC* method exceeds the accuracy of the monopulse method measurements, and thereby determine the area of its effective use.

Methods and Methodology. The study was conducted using computer modeling of the measurement of elevation angles by two types of radio direction finders. The first one used the *root-MUSIC* measurement method, and the second one used the monopulse method. Both operated at a wave of 3.2 cm and had the same receiving antenna aperture of 2.5 m. The modeling was performed for sea waves from calm to heavy. In addition to interference from the sea, interference caused by internal noise of the direction finders' receiving channels was taken into account. The modeling calculated the distance dependencies of the measurement errors of the target's position angles moving at a constant height of 20 m at a distance from 2 to 0.5 km. This ensured the overlap of the position angles in the range of 0.57...2.28 of the width of the sum directional pattern of the monopulse direction finder.

Results. Under the same sea waves and using equal apertures of the receiving antennas, the values of the errors in measuring the target elevation angles by both methods were obtained. Recommendations for choice the a priori parameters of the *root-MUSIC* method have been developed, which ensure high measurement accuracy in different interference conditions.

Conclusions. It was found that the *root-MUSIC* method has a higher accuracy of measuring the elevation angles of low-altitude targets over the sea compared to the widely used monopulse method up to position angles equal to twice the width of the sum directional pattern of the monopulse direction finder antenna.

Key words: *root-MUSIC, monopulse method, a priori parameters, elevation angle, low-altitude target, measurement errors, sea waves, multipath propagation, thermal noise, computer modeling.*