

Ю.О. Педенко, О.В. Букін, М.Г. Резніченко

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 над морем методом *Matrix Pencil* з урахуванням впливу завад багатопроменевого поширення і теплових шумів РЛС

Предмет і мета роботи. У роботі досліджено метод *Matrix Pencil* як засіб підвищення точності вимірювання кутів місця маловисотних цілей над морем. Мета дослідження полягала в тому, щоб оцінити його ефективність в умовах завад, що створюються спільно багатопроменевим поширенням, представленим дзеркальним і дифузним відбиттям радіохвиль від поверхні моря, та тепловими шумами приймальних каналів радіолокаційних станцій (РЛС), і обґрунтувати заходи, спрямовані на досягнення його високої ефективності для різних рівнів завад.

Методи і методологія роботи. Дослідження виконувалось із застосуванням комп'ютерного моделювання. Воно охопило хвилювання моря, за якого виконувалися умови як дзеркального, так і сильного дифузного відбиття, а також різні рівні теплових шумів у приймальних каналах РЛС. У процесі моделювання використовувалися типові умови: довжина траси – 2 000 м, висота приймальної антени над рівнем моря – 12 м, ширина променя антени – 1°, кутлова висота цілі – 0,3°. Ефективність методу визначалась шляхом порівняльного аналізу за ідентичних умов з раніше дослідженим методом *root-MUSIC*.

Результати роботи. Отримано дані про похибки вимірювання кута місця при використанні різних апріорних параметрів методу *Matrix Pencil*. Розроблено рекомендації щодо вибору цих параметрів, які дозволяють мінімізувати похибки вимірювання кутів місця. Визначено переваги та недоліки методу *Matrix Pencil* порівняно з методом *root-MUSIC*.

Висновок. Отримані результати можуть бути використані у процесі розроблення РЛС, призначених для супроводу маловисотних об'єктів над морем. Іл. 6. Табл. 1. Бібліогр.: 7 назв.

Ключові слова: *Matrix Pencil*, *root-MUSIC*, маловисотна ціль, кут місця, багатопроменеве поширення, тепловий шум, моделювання, похибка вимірювання.

1. Завдання дослідження. У нашій попередній роботі [1] були опубліковані результати досліджень, що стосуються ефективності використання методу *Matrix Pencil* для вимірювання кутів місця маловисотних цілей над поверхнею моря. Ці дослідження проводилися шляхом комп'ютерного моделювання з застосуванням алгоритму, заснованого на результатах роботи [2]. Їх особливістю було те, що в якості завад враховувалися тільки багатопроменеві сигнали, що надходили від поверхні моря. Ці сигнали були представлені дзеркальним і дифузним

відбиттями, розрахованими на основі моделі «блискучої поверхні» [3, 4].

Результати роботи [1] показали, що використання методу *Matrix Pencil* дозволяє істотно підвищити точність вимірювань порівняно з традиційними методами. Також встановлено невелику перевагу перед методом *root-MUSIC* в умовах багатопроменевого поширення без урахування теплових шумів приймальних каналів радіолокаційної станції (РЛС). Однак, як показали наші дослідження методу *root-MUSIC*, за наявності цих шумів його ефективність значно

знижується. Певною мірою цього слід очікувати і від методу *Matrix Pencil*. Це обумовлено тим, що ефективність обох методів найбільш висока у випадку застосування не менше півтора-двох десятків приймальних каналів [1, 5], і в результаті цього загальний рівень внутрішніх теплових шумів стає досить високим.

У зв'язку з цим ми продовжили дослідження, розпочаті в [1], але із урахуванням внутрішніх теплових шумів приймальних каналів РЛС. У даній роботі ставилося завдання з'ясування не тільки ступеня впливу шумів на точність вимірювань, але і пошуку апріорних параметрів методу *Matrix Pencil*, за яких спільний вплив всіх видів завад на точність вимірювань кута місця мінімальний.

Також було виконано порівняльний аналіз ефективності методу *Matrix Pencil* та методу *root-MUSIC*, який досліджувався раніше [5], з урахуванням згаданих вище завад. Це дає можливість обґрунтованого вибору найбільш ефективного методу для вимірювань кута місця в конкретних умовах.

2. Методика досліджень. Дослідження проводилося шляхом комп'ютерного моделювання. Використовувалися такі самі характеристики траси, вертикальний розмір приймальної антенної решітки і робоча довжина хвилі, що і в роботі [1]: довжина траси – 2 000 м; еквівалентний радіус кривизни земної поверхні – 8 500 км; висота центру приймальної антенної решітки над поверхнею моря – 12 м; максимальний нахил нерівностей поверхні моря – 0,05 рад (за використанням рівномірного розподілу нахилів); довжина радіохвилі $\lambda = 3,2$ см; кількість елементів антенної решітки $N = 156$; відстань між елементами – $\lambda / 2$; вертикальний розмір антенної решітки – 2,5 м; кутова висота цілі над поверхнею $\varepsilon_t = 0,3\Theta_{0,5}$ ($\Theta_{0,5} = 1^\circ$ – ширина за рівнем половинної потужності діаграми направленості антени, яка має розкриття, що дорівнює розміру використовуваної решітки). Дослідження проводилися за таких значень коефіцієнтів дифузного відбиття і відповідних їм коефіцієнтів дзеркального відбиття (у дужках): $\rho_d(\rho_s) = 0,10$ (0,93) і 0,36 (0,50). Це дозволило охопити умови як сильного дзеркального, так і сильного дифузного відбиття.

Дослідження включало три етапи:

- розрахунок досить великої кількості реалізацій поля сигналів для кожного поєднання

вхідних геометричних параметрів траси і хвилювання моря;

- розрахунок кутів місця цілі для кожної з цих реалізацій;
- визначення статистичних характеристик отриманих кутів та узагальнення отриманих результатів.

На першому етапі для кожного з N елементів решітки розраховувалися реалізації поля $A_n(n=1\dots N)$ сигналів на елементах решітки. Для розрахунків використовувалася модель поля, розроблена нами [6] на основі теорії «блискучої поверхні» [3, 4].

При моделюванні використовувалася незмінна геометрія траси. Щоб результати дослідження не були прив'язані до фази інтерференції між прямим і дзеркальним сигналами, обумовленої цією геометрією, а мали загальний характер, реалізації поля розраховувалися для різниць фаз між прямим і дзеркально відбитим сигналами у центрі приймальної решітки: $\Delta\varphi_0 = 0, 20, 40, \dots, 340^\circ$. Такий ряд $\Delta\varphi_0$ реалізовувався шляхом штучного добору фази відбиття в точці дзеркального відбиття. Якщо застосовувати строгий підхід, такий ряд можна отримати, використовуючи, наприклад, відповідні зсуви приймальні решітки по висоті в межах інтерференційної пелюстки або деякі незначні зміни робочої частоти та ін. Однак це ускладнило б виконання досліджень та інтерпретацію результатів.

Кожна реалізація складалася з детермінованої і випадкової складових. Детермінована частина утворювалася прямим сигналом від цілі і її дзеркальним відбиттям від поверхні моря; вона залишалася незмінною для кожної з реалізацій для конкретного поєднання фази інтерференції і коефіцієнта дзеркального відбиття. Випадкова частина утворювалася множиною дифузних відбиттів та змінювалася від реалізації до реалізації завдяки змінам їх амплітуди, фази і положення на дистанції. Для забезпечення високої статистичної достовірності для кожного поєднання параметрів $\Delta\varphi_0$, ρ_s та ρ_d розраховувалося по 1 000 реалізацій поля сигналів. Використання цих реалізацій дозволило отримати досліджувані характеристики як для кожного з використовуваних значень $\Delta\varphi_0$, так і усереднені на інтервалі $0\dots360^\circ$. У цій роботі були застосовані саме останні характеристики.

На початку другого етапу формувалися сигнали, що приймаються віртуальними антенами, синтезованими на базі елементів основної решітки. Ці сигнали використовувалися для реалізації вимірювань кута місця на основі методу *Matrix Pencil*.

Для формування сигналів основна решітка розбивалася на підрешітки, що межують одна з одною. Щоб отримати точність вимірювань, наближену до максимальної, кількість синтезованих антен K була обрана на підставі висновків роботи [1] і в даному дослідженні становила $K = 26$; при цьому кожна підрешітка містила по $I = 6$ елементів основної решітки. Вагові коефіцієнти для елементів кожної з підрешіток задавалися функцією Хемінга, що забезпечувало рівень бічних пелюсток синтезованих антен не більше -40 дБ.

Перш ніж приступити до розрахунків кута місця, вибірки сигналу доповнювалися тепловими шумами приймальних каналів РЛС. Потужність теплових шумів у кожному з каналів задавалася однаковою і обчислювалася відносно потужності прямого сигналу від цілі на виході синтезованих антен. Комплексні значення амплітуд теплових шумів для кожного з каналів, наведені до виходів їх приймальних синтезованих антен, розраховувалося за формулою:

$$\dot{w}_k = 10^{-\log((\text{ВСШ})/20)} a_{dir}(x_k + jy_k) \sum_{i=1}^I G_i,$$

де $k = 1 \dots K$ – номер віртуальної антени; $i = 1 \dots I$ – номер елемента підрешітки; ВСШ – відношення сигнал/шум, виражене в децибелах; a_{dir} – амплітуда прямої хвилі, однакова для всіх елементів антенної решітки; x_k, y_k – незалежні випадкові числа з нульовим середнім і дисперсією 0,5, розподілені за нормальним законом; G_i – значення вагової функції на i -му елементі підрешітки.

Розрахунки кутів місця виконувалися для ВСШ = 20, 30, 40, 50 дБ, а також за відсутності шумів, тобто для ВСШ = ∞ .

Для обчислень використовувався алгоритм, який реалізує метод *Matrix Pencil*, описаний у роботі [1]. Відповідно до нього, спочатку розраховувалися кути надходження M сигналів (M – апріорне значення кількості прийнятих сигналів), а також потужності кожного з цих сигналів. В якості вимірюваного кута місця цілі

використовувався кут надходження найбільш потужного сигналу з діапазону кутів місця від 0 до $\Theta_{0,5}$.

Розрахунки проводилися при різних сполученнях апріорних параметрів, в якості яких виступали передбачувана кількість сигналів M і значення *pencil*-параметра L [2], що визначає розмірність матриць, утворених з прийнятих сигналів. Використовувався широкий діапазон їх значень: $M = 2, 3, \dots, 8$; $L = M, M + 1, \dots, 12$. Однак у даній роботі результати для значень $M = 2$ і $M = 3$ не представлені, тому що в умовах, які використовувалися при моделюванні, вони призводили до неприпустимо великих похибок вимірювання.

На третьому етапі виконувалася статистична обробка отриманих результатів та оцінка ефективності використання того чи іншого сполучення апріорних параметрів методу *Matrix Pencil*. Для кількісної оцінки ефективності використовувалися середньоквадратичні похибки (СКП) вимірювань кутів місця, отримані шляхом усереднення на інтервалі різниць фаз між прямим і дзеркальним сигналами $0 \dots 360^\circ$.

3. Залежність похибок вимірювання від апріорних параметрів. Отримані СКП вимірювання кута місця представлені на рис. 1. На них у вигляді точок, з'єднаних відрізками прямих, зображені залежності СКП від *pencil*-параметра L . Кожна точка на рис. 1 відповідає одному із сполучень параметрів M, L і ВСШ. Усі точки на рис. 1, а розраховані за одними і тими самими 18 тисячами незалежних реалізацій поля, отриманих при сильному дзеркальному відбитті ($\rho_s = 0,93$; $\rho_d = 0,10$). Аналогічні дані, але отримані в умовах сильного дифузного відбиття ($\rho_s = 0,5$; $\rho_d = 0,35$), наведені на рис. 1, б. Графіки на рис. 1 містять по 5 кривих, кожна з яких розрахована при відповідному ВСШ.

Звернемося до залежностей СКП від *pencil*-параметра L . З рис. 1 видно, що за відсутності шумів у приймальних каналах (ВСШ = ∞) найменші похибки отримуємо за умови $L = M$, тобто при мініальному його можливому значенні. Зі зростанням параметра L спостерігається збільшення похибок вимірювання. При максимальному його значенні, яке використовувалося в роботі, $L_{\max} = 12$, похибки збільшуються удвічі і більше (за винятком випадку $M = 8$, коли СКП практично не змінюються). Таким

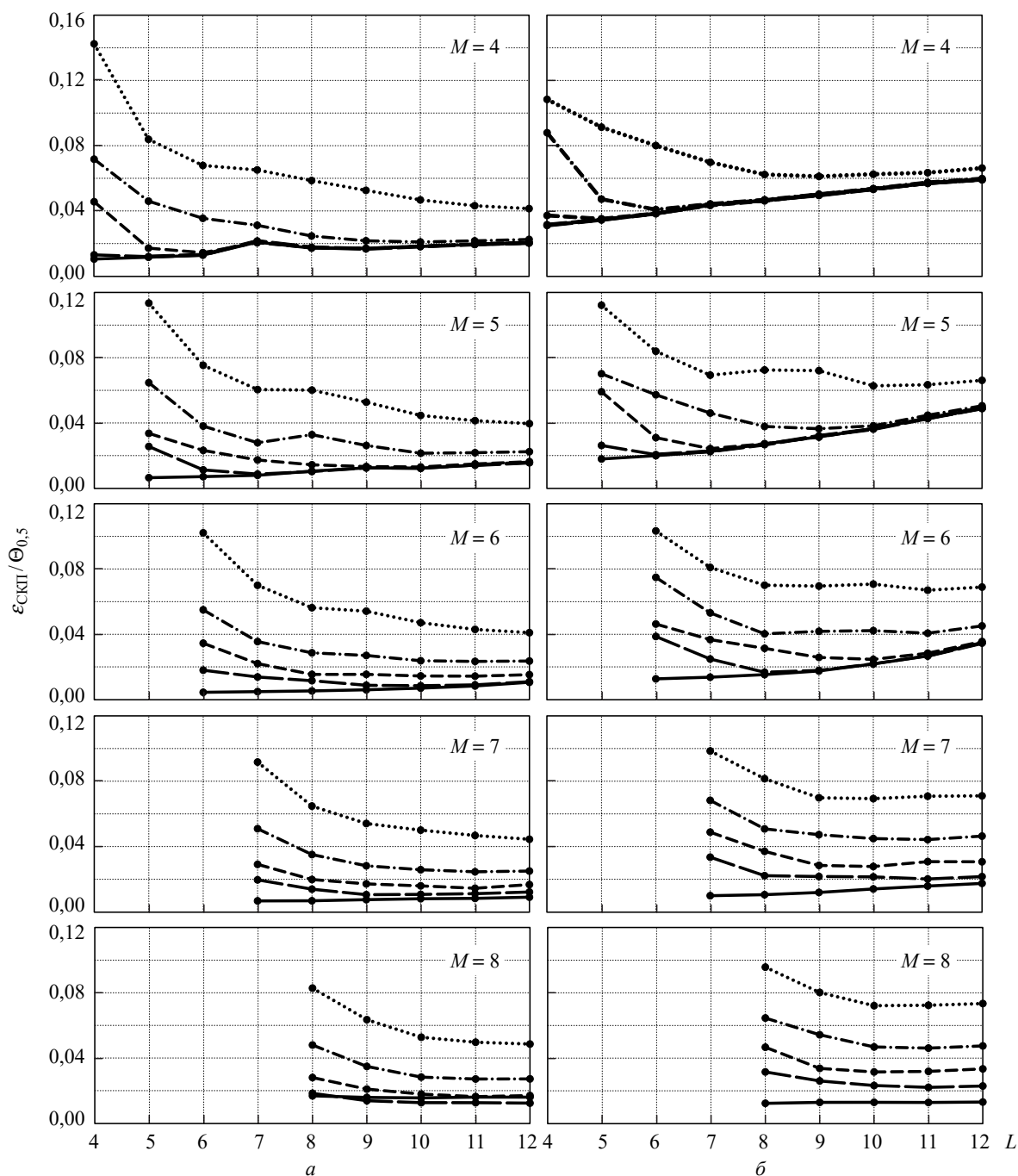


Рис. 1. Середньоквадратичні похибки вимірювання кута місця методом *Matrix Pencil* для різних значень апріорних параметрів M і ВСШ (..... ВСШ = 20 дБ, -.-.- 30 дБ, - - - 40 дБ, — 50 дБ, — ∞) за умов: a – сильного дзеркального відбиття; b – сильного дифузного відбиття

чином, в умовах завад, створюваних виключно багатопроменевими сигналами, слід використовувати мінімально можливе значення *pencil*-параметра L .

У дослідях, коли теплові шуми максимальні (ВСШ = 20 дБ), залежності похибок від параметра L змінюються, причому характер змін за-

лежить від характеристик відбиття радіохвиль від моря. Розглянемо випадок сильного дзеркального відбиття (рис. 1, a). Він відрізняється тим, що потужність шумів приймальних каналів стає сумірною з потужністю ослабленого в даному випадку дифузного відбиття. Як наслідок, залежність похибок вимірювання кута міс-

ця від параметра L змінюється на протилежну – зі зростанням L похибки зменшуються. Це свідчить про те, що збільшення *pencil*-параметра ефективно для боротьби з завадами, створеними тепловими шумами. На користь цього свідчать результати, які стосуються і до випадку сильного дифузного відбиття (рис. 1, б). Однак зменшення похибок зі зростанням L внаслідок високого рівня дифузійної компоненти чітко спостерігається лише на початковій ділянці залежностей. Подальше зростання L практично не позначається на величині похибок.

Коли ВСШ набуває проміжних значень ($20 \text{ дБ} < \text{ВСШ} < \infty$), то залежність похибок від параметра L при сильному дзеркальному відбитті відрізняється від залежності при сильному дифузному відбитті. У першому випадку зі збільшенням L похибки при малих значеннях цього параметра монотонно зменшуються, переходячи в область плато. У другому випадку похибки спочатку також зменшуються, але потім починають зростати. Ступінь цього зростання яскравіше виражена за умови $M \leq 6$. Можна зробити висновок, що збільшення параметра L зменшує похибки вимірювання, пов'язані з тепловими шумами приймальних каналів, а його зменшення знижує похибки, пов'язані з дифузним відбиттям. Зазначені особливості залежностей дозволяють обрати оптимальне значення *pencil*-параметра для тих чи інших умов вимірювань.

З рис. 1 видно, що теплові шуми приймальних каналів значною мірою (у декілька разів) погіршують точність вимірювань. При найменшому ВСШ, використовуваному в цій роботі, неможливо виявити вплив параметра M на величину мінімальних похибок. Так, на рис. 1, а в широкому діапазоні значень $M = 4..8$ і $\text{ВСШ} = 20 \text{ дБ}$, мінімальна похибка становить близько $0,4\Theta_{0,5}$, а на рис. 1, б – близько $0,7\Theta_{0,5}$. Для досягнення найкращих результатів слід забезпечити достатньо високе ВСШ.

4. Результати порівняння методів *Matrix Pencil* і *root-MUSIC*. Для порівняння методів скористаємося графіками, представленими на рис. 1 і 2. Графіки на рис. 2 стосуються методу *root-MUSIC* і запозичені з роботи [7], однак доповнені новими результатами для випадків $M = 7$ і $M = 8$. Дані на цих графіках розраховані з використанням тих же реалізацій поля сиг-

налів, що і на рис. 1, що значно підвищує достовірність результатів порівняння. На рис. 2 показані залежності СКП від параметра L , а на рис. 1 – від параметра p . Спільним для цих параметрів є те, що в обох методах вони визначають розмірність матриць, які використовуються у розрахунках, створених на основі прийнятих сигналів, і їх мінімальне значення не може перевищувати значення параметра M .

Використовуючи графіки на рис. 1 і 2, можна знайти на кожній кривій точку з мінімальним значенням СКП. Ці значення представлені у вигляді кластерних стовпчикових діаграм: на рис. 3 – для випадку сильного дзеркального відбиття, а на рис. 4 – для сильного дифузного відбиття. Кожен з цих рисунків містить по дві діаграми: ліворуч – стосуються методу *root-MUSIC*, а праворуч – *Matrix Pencil*. Кожен кластер на них відноситься до відповідного ВСШ і складається з п'яти стовпців. Черговість стовпців у кожному кластері визначається послідовністю значень параметра M , за яких вони були отримані: першому стовпцю відповідає значення $M = 4$, другому – $M = 5$, ..., п'ятому – $M = 8$. Мінімальна СКП вимірювання кута місця в кожному з кластерів відображається темним стовпцем. Це дає можливість визначити апріорне значення M , яке (поряд з відповідним значенням L , про вибір якого говорилося вище) забезпечує найбільш високу точність вимірювань для поточної ситуації.

Порівнюємо характеристики методів для випадку сильного дзеркального відбиття. Спочатку відзначимо переваги методу *Matrix Pencil*, виявлені в цьому дослідженні. Так, за наявності тільки багатопроменевих завад досягні мінімальні похибки за методом *Matrix Pencil* менші, ніж за методом *root-MUSIC*. Це видно з порівняння висоти темних стовпців на рис. 3, а і б при $\text{ВСШ} = \infty$, а також з даних таблиці, в

Співвідношення мінімальних СКП методів *Matrix Pencil* та *root-MUSIC* для різних ВСШ

Характер відбиття	ВСШ, дБ				
	20	30	40	50	∞
Сильне дзеркальне	1,48	1,49	1,32	1,28	0,80
Сильне дифузне	1,49	1,42	1,28	1,07	0,78

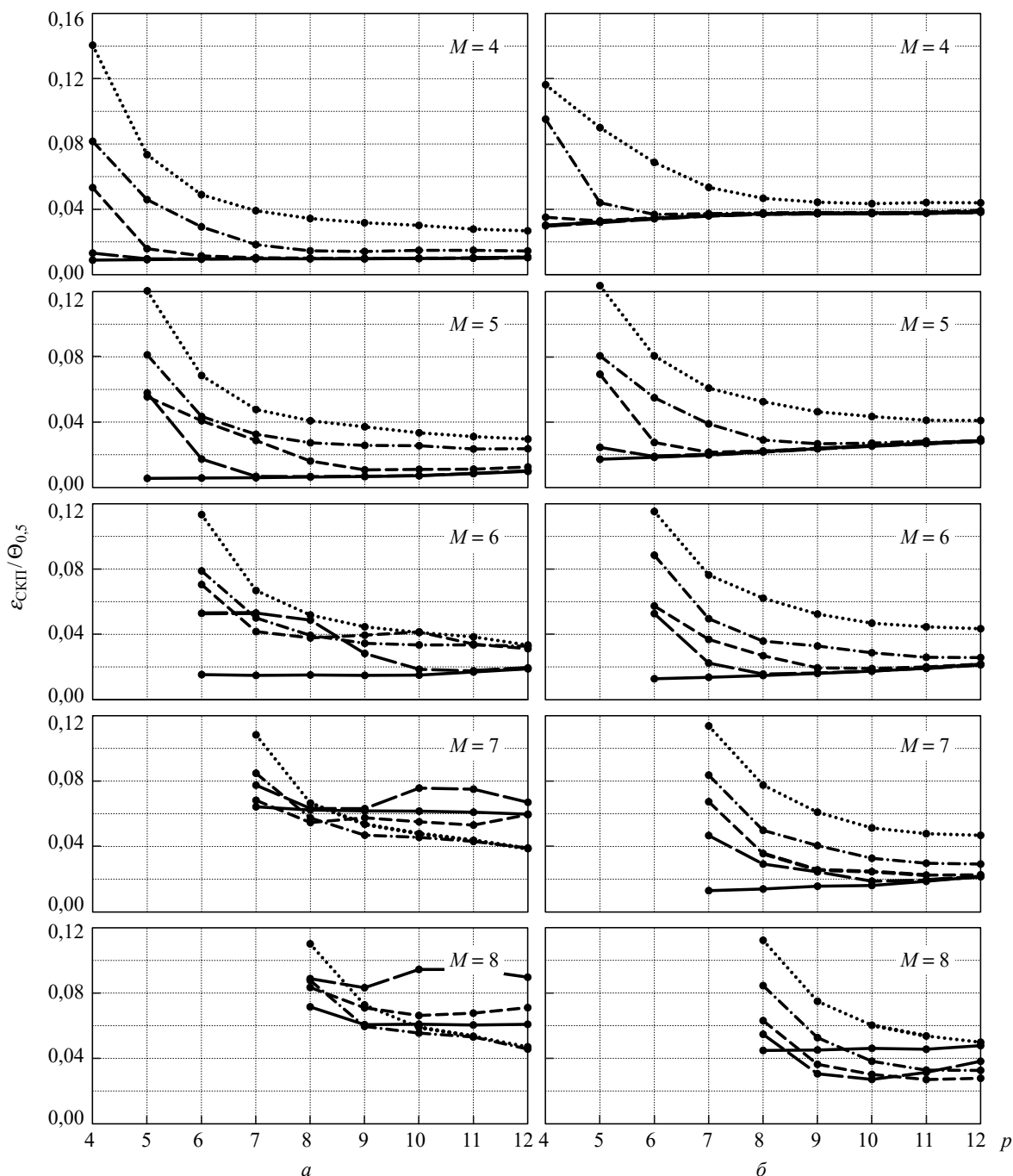


Рис. 2. Середньоквадратичні похибки вимірювання кута місця методом *root-MUSIC* для різних значень апріорних параметрів M і ВСШ (..... ВСШ = 20 дБ, ······ 30 дБ, --- 40 дБ, — 50 дБ, — ∞) за умов: a – сильного дзеркального відбиття; b – сильного дифузного відбиття

якій показано, що для цього випадку похибки методу *Matrix Pencil* на 20 % менші за похибки *root-MUSIC*.

Другою перевагою є те, що СКП за методом *Matrix Pencil* менш чутливі до похибок вибору апріорного параметра M . Про це свідчить невеликий розкид висоти стовпців у межах кожно-

го кластера на рис. 3, б. Водночас у методі *root-MUSIC* бачимо істотне (у декілька разів) збільшення цих похибок при зростанні параметра M вище оптимального значення (рис. 3, а). Це висуває більш жорсткі вимоги до точності вибору цього параметра при використанні методу *Matrix Pencil*.

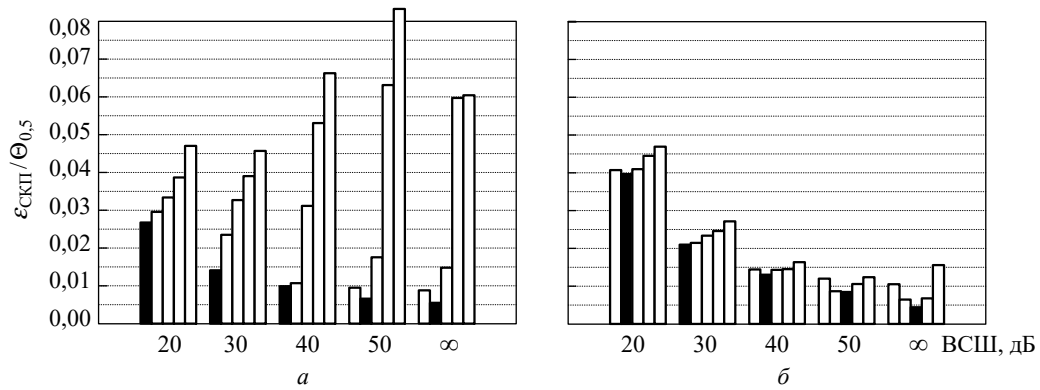


Рис. 3. Залежність мінімальних СКП вимірювання кута місця від ВСШ для різних значень параметра M в умовах сильного дзеркального відбиття: a – метод *root-MUSIC*; b – метод *Matrix Pencil*

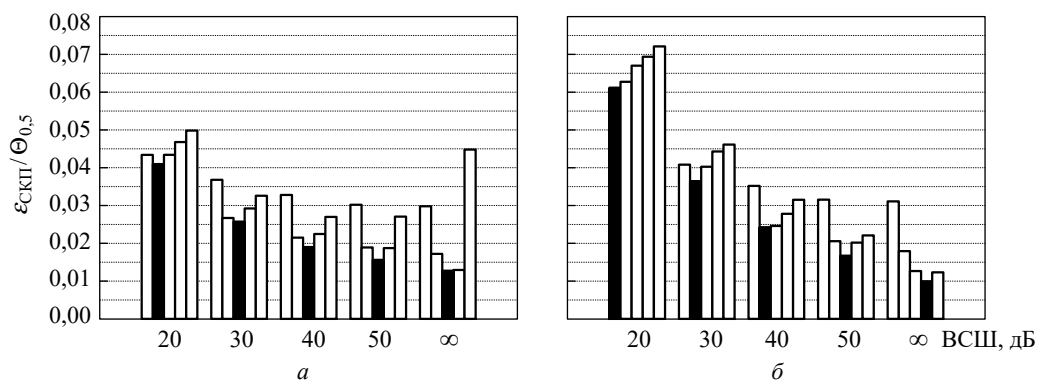


Рис. 4. Залежність мінімальних СКП вимірювання кута місця від ВСШ для різних значень параметра M в умовах сильного дифузного відбиття: a – метод *root-MUSIC*; b – метод *Matrix Pencil*

Однак метод *Matrix Pencil* поступається методу *root-MUSIC* за наявності теплових шумів. З таблиці видно, що, володіючи більш високою точністю при відсутності шумів ($BCШ = \infty$), з появою і зростанням шумів метод *Matrix Pencil* поступово втрачає цю перевагу. У випадку найгіршого відношення ($BCШ = 20$ дБ) похибки методу *Matrix Pencil* майже в півтора рази перевищують похибки методу *root-MUSIC*.

Порівняння ефективності обох методів за умов сильного дифузного відбиття призводить майже до таких самих результатів, що і при сильному дзеркальному відбитті. З даних таблиці випливає, що відношення мінімальних СКП в обох методах при однакових шумах практично однакові.

Що стосується залежності мінімальних похибок від апріорної кількості прийнятих сигналів (або розмірності підпростору сигналів), то бачимо, що залежність СКП від апріорного значення цього параметра в умовах сильного дифузного відбиття у методі *root-MUSIC* істотно

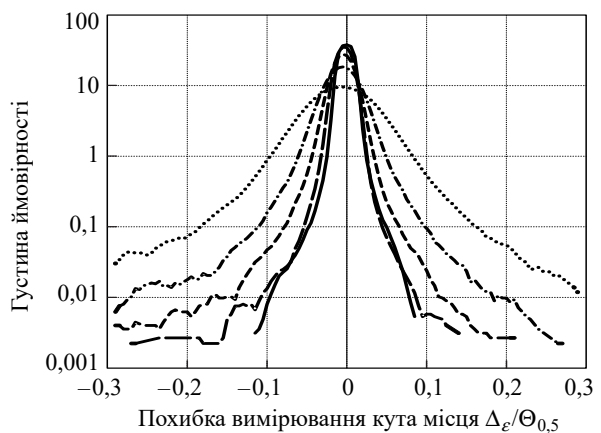


Рис. 5. Розподіл похибок вимірювання кута місця при високому рівні дзеркального відбиття: $BCШ = 20$ дБ, - · - · - 30 дБ, - - - 40 дБ, - - - 50 дБ, — ∞

знизилася і стала близькою до залежності у методі *Matrix Pencil*, за винятком випадку відсутності шумів.

5. Розподіли похибок вимірювання кутів місця. На рис. 5 наведено розподіли похибок за методом *Matrix Pencil* для високого рів-

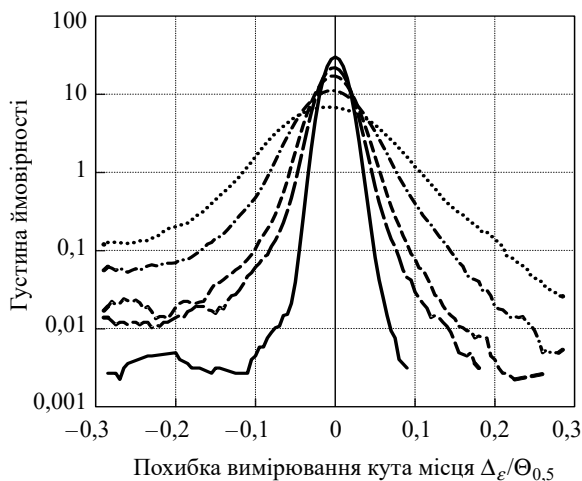


Рис. 6. Розподіл похибок вимірювання кута місця при високому рівні дифузного відбиття: ВСШ = 20 дБ, ---- 30 дБ, -.-.- 40 дБ, — 50 дБ, — ∞

ня дзеркального відбиття ($\rho_d = 0,1$; $\rho_s = 0,92$) і різних ВСШ, а на рис. 6 – аналогічні розподіли похибок для високого рівня дифузного відбиття ($\rho_d = 0,35$; $\rho_s = 0,50$). З метою полегшення аналізу «хвостів» розподілів використаний логарифмічний масштаб по осі ординат. Значення pencil-параметра L і апіорна кількість корисних сигналів M були обрані однаковими для обох випадків відповідно до результатів, представлених на рис. 1, так, щоб отримати похибки вимірювання, близькі до мінімальних: $M = 7, L = 9$.

З рис. 5 видно, що максимуми розподілів практично збігаються з напрямом на ціль, спостерігається лише невелике їх зміщення в бік моря при зменшенні ВСШ. Середні значення похибок також малі – для гіршого випадку (ВСШ = 20 дБ) воно становить $-0,0063\Theta_{0,5}$. Розподіли похибок для умов дзеркального відбиття близькі до симетричних щодо напрямку на ціль. Зростання СКП, пов'язане зі зменшенням ВСШ, відбувається в основному за рахунок збільшення розкиду похибок вимірювання.

Розглянемо розподіли, отримані при сильному дифузному відбитті (рис. 6). Не зважаючи на погіршення симетричності на «хвостах» розподілу, що виражається в більш високій ймовірності від'ємних похибок, середня похибка збільшується незначно і в гіршому випадку становить $-0,0075\Theta_{0,5}$. Видно, що зростання СКП зі зменшенням ВСШ також відбувається в основному за рахунок збільшення розкиду похибок.

Висновки. Досліджено ефективність методу *Matrix Pencil* для вимірювання кутів місця маловисотних цілей поблизу схвильованої поверхні моря в умовах завад, створюваних багатопроменевим поширенням і тепловими шумами приймальних каналів.

Вивчено вплив апіорних параметрів методу, таких як кількість корисних сигналів M та pencil-параметр L , який визначає розмірність матриці, складеної з сигналів, що приймаються вертикальною еквідистантною антенною решіткою, на точність вимірювань. Дослідження проводилося як за умов сильного дифузного, так і переважно дзеркального типу відбиття, при різних ВСШ.

Встановлено, що похибки методу *Matrix Pencil* при високому рівні теплових шумів (ВСШ ≤ 40 дБ), незалежно від характеру відбиття радіохвиль від поверхні моря, слабо залежать від значення параметра M . Однак при низькому рівні теплових шумів або за їх відсутності ця залежність проявляється більш чітко, при цьому спостерігається зменшення похибок для $M = 5 \dots 7$. Ці значення слід вважати оптимальними за будь-яких умов, згаданих вище.

Обираючи pencil-параметр L з метою мінімізації похибок, слід керуватися таким правилом: за відсутності шумів слід обирати $L = M$, а за їх наявності – $L \geq M + 2$.

Здійснено порівняння ефективності методів *Matrix Pencil* та *root-MUSIC* за ідентичних умов. Показано, що метод *Matrix Pencil* більш чутливий до впливу теплових шумів. Володіючи високою точністю вимірювань за наявності тільки багатопроменевих завад та перевершуючи метод *root-MUSIC* при цьому на 20 %, метод *Matrix Pencil* з появою і зростанням шумів поступається методу *root-MUSIC*. Коли ВСШ наближається до 20 дБ, точність вимірювань зменшується у півтора рази. Перевагою методу *Matrix Pencil* є більш слабка залежність точності вимірювань від параметра M , це виключає великі похибки вимірювань при неточному його виборі.

Отримані висновки стосуються типової ситуації, яка зустрічається на практиці, але все ж є окремим випадком. У зв'язку з цим нами передбачається подальше проведення досліджень, що охоплюють значно ширший діапазон вхідних умов.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Педенко Ю.А. Использование метода *Matrix Pencil* для радиолокационного измерения углов места маловысотных целей над взволнованным морем. *Радіофізика та електроніка*. 2018. Т. 23, № 1. С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2018.01.010>.
2. Sarkar T.K., Pereira O. Using the Matrix Pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponential. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 1995. Vol. 37, Iss. 1. P. 48–55. DOI: 10.1109/74.370583.
3. Бескман Р., Spizzichino А. *The scattering of electromagnetic wave from rough surface*. London: Pergamon press, 1963. 303 p.
4. Бартон Д. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места. *Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон.* 1974. Т. 62, № 6. С. 37–61.
5. 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. *Радіофізика та електроніка*. 2016. Т. 7(21), № 1. С. 22–30. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2016.01.022>.
6. 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.

Стаття надійшла 09.03.2021

REFERENCES

1. Pedenko, Yu.A., 2018. Using the *Matrix Pencil* method for radar measurement of an elevation angle of low-altitude targets over agitated sea. *Radifiz. Elektron.*, **23**(1), pp. 10–18 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2018.01.010>.
2. Sarkar, T.K., Pereira, O., 1995. Using the matrix pencil method to estimate the parameters of a sum of complex exponentials. *IEEE Antennas Propag. Mag.*, **37**(1), pp. 48–55. DOI: 10.1109/74.370583.
3. Бескман, Р., Spizzichino, А., 1963. *The scattering of electromagnetic wave from rough surface*. London: Pergamon press.
4. 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>.
5. Pedenko, Yu.A., 2016. Radar elevation angles measurements of low-altitude targets over the sea by *root-MUSIC* method under interference from multipath and thermal noise of direction finder. *Radifiz. Elektron.*, **7**(21)(1), pp. 22–30 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2016.01.022>.
6. 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).

Received 09.03.2021

Yu.O. Pedenko, A.V. Bukin, N.G. Reznichenko

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

RADAR MEASUREMENT OF TARGET ELEVATION OVER
THE SEA USING MATRIX PENCIL METHOD WITH MULTIPATH INTERFERENCE
AND RADAR THERMAL NOISE CONSIDERED

Subject and Purpose. The paper is concerned with the Matrix Pencil method as a means to improve accuracy of low-altitude target elevation measurements over the sea. The main interest is to estimate the Matrix Pencil efficiency in multipath interference conditions associated with specular and diffuse radio wave reflection from the sea surface in combination with the thermal noise in radar receiving channels and justify measures to achieve a high-performance approach in different-level interference circumstances.

Methods and Methodology. The study is conducted by means of computer simulation which covers specular and strong diffuse reflection processes of the random sea and different-level thermal noise in radar receiving channels. Typical simulation conditions are used. Specifically, the path length is 2000 m, the height of the receiving antenna over the sea is 12 m, the antenna beam width is 1°, the target angle of elevation is 0.3°. The Matrix Pencil efficiency is assessed by comparing it with that of the already proved root-MUSIC method in identical conditions.

Results. Data on elevation measuring errors have been collected for various a priori parameters of the Matrix Pencil method. Recommendations as to the choice of these parameters for keeping elevation measuring errors to a minimum have been developed. Advantages and disadvantages of the Matrix Pencil compared with the root-MUSIC have been shown.

Conclusion. The obtained results can be used in the development of radar devices for tracking low-altitude objects over the sea.

Keywords: *Matrix Pencil, root-MUSIC, low-altitude target, angle of elevation, multipath, thermal noise, simulation, elevation measuring error.*