

О.О. Гейко, І.А. Варава, Г.С. Пуха, В.В. Дембіцький, А.В. Вдовина
**МЕТОД ВАЛІДАЦІЇ ЧИСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ
ПОШИРЕННЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ
З УЗГОДЖЕННЯМ ЧАСТОТ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ ТА СПЕКТРАЛЬНОЇ ОЦІНКИ**

Анотація. У роботі запропоновано метод валідації гідроакустичних чисельних моделей за даними натурних вимірювань, орієнтований на автоматизоване порівняння сигналів з різними частотами дискретизації. Метод включає вибір цільової частоти з кратністю до степеня двійки для коректного застосування FFT, ціло- та дробовий ресемплінг з антиаліасинговою FIR-фільтрацією, спектральне перетворення із вікном Блекмана та виділення амплітуди на частоті випромінювача. Перед оцінюванням виконуються перевірки коректності налаштувань FDTD (просторова роздільна здатність, умова CFL, наявність вираженого піку та фазова узгодженість). Якість моделі оцінюється за абсолютним відхиленням, відносним коефіцієнтом та метрикою MSE на нормованих рядах амплітуд. Серія експериментів показала, що виділення цільової частоти зменшує вплив широкосмугового шуму і забезпечує стійкішу та інформативнішу оцінку узгодженості моделі з натурними даними.

Ключові слова: гідроакустика; валідація моделей; ресемплінг; FIR-фільтрація; FFT; FDTD; MSE; обробка сигналів.

Постановка проблеми. У сучасних програмно-апаратних комплексах, які функціонують у складних фізичних середовищах, математичні моделі виступають ключовим інструментом для аналізу та прогнозування хвильових процесів. Надійність таких систем безпосередньо залежить від точності використаних чисельних методів. Проте, жодна модель не є ідеальною, що зумовлює необхідність її ретельної валідації на основі даних натурних експериментів.

Однією з основних проблем при валідації є те, що безпосереднє порівняння «сирих» вихідних даних моделі з даними натурних вимірювань є технічно неможливим. Це зумовлено неузгодженістю природи дискретизації: гідроакустичні станції отримують сигнал із фіксованою апаратною частотою, тоді як математична модель генерує дані з частотою, що залежить від обраного часового кроку моделювання, який жорстко обмежується параметрами розрахункової сітки та фізичними властивостями середовища. Оскільки масиви даних моделі та сенсора мають різну кількість відліків на одиницю часу, спроба їх прямого накладання у часовій області є математично некоректною і призводить до хибних висновків. Це породжує науково-прикладну задачу розробки спеціалізованих методів підготовки даних, які б дозволили автоматизувати процес оцінки якості без втрати фізичного змісту сигналів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попри наявність ґрунтовної теоретичної бази, існує певний розрив між класичними методами DSP та специфічними вимогами до автоматизованої валідації гідроакустичних моделей. Більшість існуючих підходів розглядають обробку сигналів та моделювання як окремі процеси, не пропонуючи єдиного алгоритмічного рішення для порівняння різночастотних рядів з урахуванням метрик точності (MSE) та апаратних ресурсів. Невирішеною залишається проблема побудови уніфікованого методу, який би поєднував адаптивний ресемплінг, спектральну селекцію та статистичну оцінку в рамках єдиного програмного комплексу.

Мета дослідження. Мета дослідження полягає у розробці та обґрунтуванні методу валідації математичних моделей розповсюдження акустичних хвиль, який дозволяє вирішити проблем у несумісності «сирих» даних шляхом узгодження частот дискретизації між чисельною моделлю та даними натурних вимірювань.

Викладення основного матеріалу дослідження. Однією з основних проблем при валідації чисельних моделей за даними натурних експериментів є розбіжність частот дискретизації. Гідроакустичні станції отримують сигнал із фіксованою частотою, тоді як модель генерує дані з частотою, що залежить від обраного часового кроку моделювання, який обмежується параметрами сітки та фізичними властивостями середовища.

Оскільки масиви даних моделі та сенсора мають різну кількість відліків на одиницю часу, їх безпосереднє порівняння є математично некоректним. Саме тому першим кроком алгоритму є процедура ресемплінгу.

Головною умовою для коректного розрахунку є кратність цільової частоти, тобто щоб довжина вибірки N , що відповідає F_{out} , була степенем двійки. Це також є необхідною умовою для ефективного використання алгоритму швидкого перетворення Фур'є (FFT – Fast Fourier Transform). Сам алгоритм пошуку цільової частоти F_{out} відбувається в два етапи:

- 1) Встановлюється початкове значення $F_{out} = 1$ Гц.
- 2) Виконується ітераційний пошук (1):

$$\text{поки } F_{out} < F_S, F_{out} = F_{out} \times 2, \quad (1)$$

де F_S - корисна частота дискретизації (частота випромінювача) (Гц).

Наступний крок – інтерполяція та децимація.

Децимація - зменшення частоти дискретизації дискретного в часі сигналу шляхом проріджування його відліків.

Інтерполяція - спосіб знаходження проміжних значень величини за наявним дискретним набором відомих значень.

Після фіксації F_{out} аналізується співвідношення з вхідною частотою F_{inp} (2). Якщо $F_{inp} \% F_{out} = 0$, то застосовується цілочисельна децимація. Коефіцієнт прорідження[1]:

$$m = F_{inp} / F_{out}, \quad (2)$$

де F_{inp} – частота дискретизації вхідного сигналу (Гц), F_{out} – вихідна частота (Гц).

Сигнал формується шляхом вибору кожного m -го елементу масиву (3):

$$Out[i] = Inp[i \times m], \quad (3)$$

Якщо ж частоти не кратні, тобто

$$F_{inp} \% F_{out} \neq 0,$$

то застосовується дробовий ресемплінг (4). Розраховуються коефіцієнти інтерполяції та децимації [2], такі, що:

$$\frac{F_{inp} \times interp}{decim} = F_{out}, \quad (4)$$

де $interp$ та $decim$ – коефіцієнти інтерполяції та децимації відповідно.

За допомогою описаного вище підходу можна уникнути значних похибок дискретизації при переході між несумісними частотами.

З метою усунення ефекту аліасингу (накладання або нечіткість різних безперервних сигналів при їхній дискретизації), перед зниженням частоти обов'язковою умовою є низькочастотна фільтрація. У даній роботі запропоновано об'єднати процес фільтрації з процесом вибірки, тобто замість повного розрахунку згладження для проміжного масиву обчислення виконуються лише для тих точок, які потрапляють у вихідний масив F_{out} . Формула розрахунку значень вихідного сигналу [3] з використанням FIR-фільтра $h[k]$ має вигляд (5):

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \times X_L[n \times m - k], \quad (5)$$

де N – довжина фільтра, $h[k]$ – коефіцієнти FIR-фільтра, X_L – інтерпольований вхідний сигнал, m – коефіцієнт децимації, k – зсув.

Застосування такого підходу розраховане на зменшення кількості математичних операцій, оскільки виключає обробку даних, що будуть відкинуті після децимації.

Завершальним кроком підготовки даних є перехід від часової області до частотної. Оскільки попередні кроки (1.1–1.3) гарантували, що довжина вихідного масиву N є степенем двійки, застосовується алгоритм швидкого перетворення Фур'є (Fast Fourier Transform).

Перед виконанням спектрального перетворення, для мінімізації ефекту розтікання енергії спектра (spectral leakage), що виникає через скінченність часової вибірки та розриви на її краях, до сигналу застосовується вагова віконна функція. У роботі використано вікно Блекмана (Blackman window) (7), яке забезпечує ефективне придушення бічних пелюсток спектра порівняно з прямокутним вікном. Математично ця операція описується множенням вхідного масиву на вагові коефіцієнти (6):

$$y_w[n] = y_m[n] \times w[n], \quad (6)$$

де функція вікна Блекмана визначається як:

$$w[n] = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.8 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right). \quad (7)$$

Математична модель для отримання спектру [4] $X(f)$ з підготовленого дискретного сигналу $y_m[n]$ довжиною N має вигляд (8):

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} y_m[n] e^{-j2\pi f n / N}, \quad (8)$$

де $y_m[n]$ – вхідний сигнал в поточний момент часу.

Результатом перетворення є комплексний спектр. Для цілей валідації нас цікавить не весь спектр, а лише амплітуда корисного сигналу на частоті випромінювача F_S .

Амплітуда (9) визначається за найближчим дискретним відліком частоти або з використанням інтерполяції спектра.

$$A(F_S' t) = |X(F_S' t)|. \quad (9)$$

Це дозволяє отримати чіткі числові ряди амплітуд A_{model} та A_{real} , очищені від спектральних компонент на інших частотах. Отримані значення формують вхідний набір даних для етапу валідації.

Проведемо порівняння даних та зробимо оцінку якості моделі.

Перед порівнянням амплітуд алгоритм виконує перевірку на коректність налаштувань моделі FDTD (Finite-Difference Time-Domain). Якщо просторова сітка моделі занадто груба, отримана амплітуда на цільовій частоті буде містити лише числову дисперсію ("шум"), а не корисний сигнал.

Алгоритм перевіряє співвідношення довжини хвилі до кроку сітки Δx . Довжина хвилі (10) розраховується як:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (10)$$

де c – швидкість звуку у середовищі (м/с), а f – цільова частота (Гц).

Згідно з теорією моделювання [5], для коректного відтворення хвилі сітка повинна мати мінімум 6–10 вузлів на довжину хвилі:

$$\frac{\lambda}{\Delta x} \geq 6 \dots 10.$$

Якщо ця умова не виконується (наприклад, крок сітки 10 м при довжині хвилі 40 м дає лише 4 точки), то результат моделювання визнається недостовірним ще до етапу порівняння.

Окрім просторової роздільної здатності, критичним є крок у часі Δt . Алгоритм перевіряє виконання умови Куранта-Фрідрікса-Леві (CFL) [6], яка для n -вимірного випадку має вигляд (11):

$$c = \Delta t \sum_{i=1}^n \frac{U_{x_i}}{\Delta x_i} \leq c_{max}, \quad (11)$$

де Δt – крок за часом (с), U_{x_i} – швидкість хвилі вздовж i -ої осі (м/с), Δx_i – крок просторової сітки, c_{max} – умова стабільності.

А для випадку тривимірного простору це рівняння набуває вигляду (12):

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c \times \sqrt{3}}, \quad (12)$$

де c – швидкість звуку (м/с).

Якщо обраний крок часу Δt більший за граничний, чисельна схема стає нестійкою, а результати моделювання — фізично некоректними.

Додатково виконується перевірка на наявність вираженого піку у спектрі. Якщо амплітуда на частоті F_S не перевищує рівень шумового порогу (шум занадто сильний або джерело занадто слабке), порівняння зупиняється, оскільки воно не має фізичного змісту.

У вимірювальному тракті або в чисельній моделі можливе віддзеркалення сигналу за знаком $x(t) \rightarrow -x(t)$. Для гармонічної складової це відповідає зсуву фази на π , тобто проти фази. Щоб не отримати хибно “добру” відповідність лише за амплітудою, перед розрахунком метрик виконується перевірка інверсії на початковому вікні довжиною K відліків.

Якщо етап попередньої перевірки пройдено успішно, тоді виконується кількісне порівняння амплітуд моделі A_{model} та сенсора A_{real} . У роботі запропоновано використовувати два типи операцій для виявлення різних класів похибок: абсолютне відхилення (шляхом віднімання) та відносний коефіцієнт (шляхом ділення). Оскільки абсолютні значення сигналів можуть мати різні одиниці виміру або масштабні коефіцієнти (наприклад, через особливості калібрування натурального датчика), критично важливою передумовою розрахунку є процедура нормалізації. Перед виконанням порівняння обидва ряди амплітуд приводяться до єдиного безрозмірного діапазону $[0..1]$.

Базова оцінка точності виконується шляхом віднімання нормованих амплітуд (13). Це показує енергетичну різницю між моделлю та реальністю:

$$\Delta E = A_{real} - A_{model}. \quad (13)$$

Графічна інтерпретація цього методу дозволяє побачити, наскільки модель завищує або занижує сигнал у кожен момент часу.

Для виявлення грубих аномалій та сингулярностей використовується операція ділення. Розраховується коефіцієнт відношення (14):

$$K = \frac{A_{real}}{A_{model}}. \quad (14)$$

Цей метод є критично важливим для виявлення ситуацій, коли модель втрачає сигнал.

Наприклад, якщо реальна амплітуда $A_{real} = 1$, а модельна $A_{model} \approx 0.0001$, то просте віднімання покаже помилку ≈ 1 . Проте операція ділення покаже $K = 10000$, що сигналізує про катастрофічну розбіжність або некоректні граничні умови (наприклад, неправильно задані поглинаючі шари PML), які повністю заглушили сигнал. На основі отриманих значень ΔE та K приймається рішення про валідність моделі.

Для кількісної оцінки якості моделі використовуються стандартні метрики, що дозволяють отримати узагальнену оцінку похибки по всій вибірці. Основним інструментом є MSE (Mean Squared Error) [7] - середньоквадратична похибка. Вона показує, наскільки в середньому відхиляються прогнозовані значення від реальних. Головною особливістю MSE (15) є те, що великі похибки мають значно більшу вагу (через піднесення до квадрату), що робить цю метрику чутливою до грубих промахів моделі.

Формула розрахунку:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y[n] - \hat{y}[n])^2, \quad (15)$$

де N – кількість точок порівняння.

В рамках дослідження обраного методу було проведено 5 експериментів, де розмір модельованої акваторії становив 2000×2000 метрів, крок сітки – 2 метри, частота випромінювача – 20 Гц. Координати станцій: HAS1 – 1490;1750, HAS2 – 1500;1750.

Отримані “сірі” сигнали мали різні частоти дискретизації (модель — залежно від кроку часу, станція — апаратно фіксовану), тому пряме зіставлення у часовій області було некоректним. Для узгодження даних застосовано процедуру вибору цільової частоти дискретизації та ресемплінгу з антиаліасинговою FIR-фільтрацією. Далі виконувалося спектральне перетворення FFT (із вікном Блекмана) та виділялася амплітудна складова на цільовій частоті 20 Гц, що формувало два порівнювані ряди амплітуд — для моделі та для натурних даних.

Перед обчисленням метрик алгоритм автоматично перевіряв коректність налаштувань моделі: достатність просторової роздільної здатності (кількість вузлів на довжину хвилі), виконання умови стійкості CFL, наявність вираженого піку на частоті 20 Гц та фазову узгодженість. Це дозволяло відсікти випадки, коли отримана амплітуда є наслідком числової дисперсії або нестійкості схеми, а не фізичного сигналу.

Для оцінки узгодженості моделі з експериментом використовувалися два види порівняння на нормованих рядах амплітуд: (1) абсолютне відхилення, яке відображає систематичне завищення/заниження амплітуди моделлю у часі; (2) відносний коефіцієнт, чутливий до грубих аномалій, коли модель “втрачає” сигнал (наприклад, через некоректні граничні умови або надмірне поглинання).

Графічний опис алгоритму:

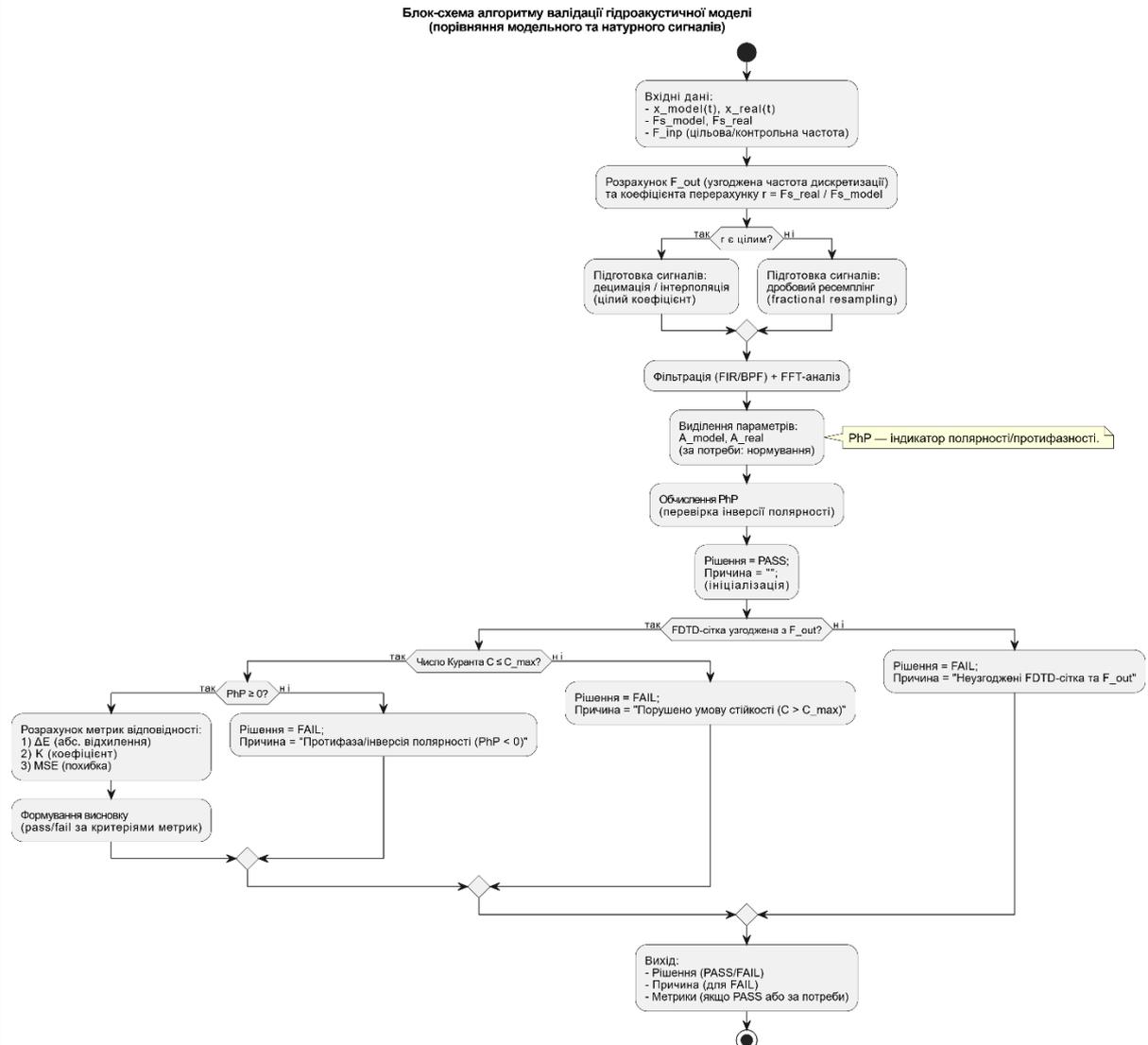


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму валідації гідроакустичної моделі за результатами порівняння модельного та натурального сигналів

Для кількісного зіставлення змодельованих даних і даних натурних вимірювань використано критерій середньоквадратичної похибки MSE. На рис. 2 наведено порівняння значень MSE для обох підходів у серії експериментів 1–5. Виділення цільової частоти 20 Гц зменшує вплив широкосмугового шуму натурних даних і дає більш стійку оцінку узгодженості моделі з експериментом, що проявляється у суттєво менших значеннях MSE для оброблених даних порівняно з “сирими” сигналами.

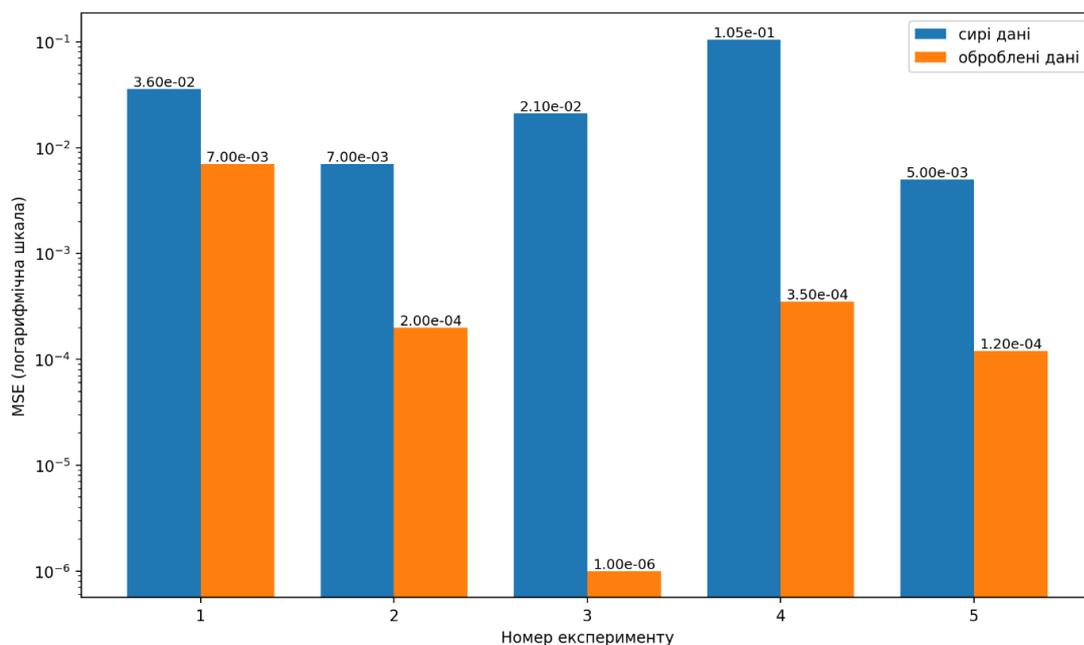


Рисунок 2 – Значення MSE для експериментів 1–5 при застосуванні методу узгодження частот дискретизації та спектрального виділення цільової частоти (ресемплінг + FIR-фільтрація + FFT + нормування)

Висновки. Запропоновано уніфікований метод валідації гідроакустичних моделей, який усуває проблему несумісності “сирих” даних моделі та натурних вимірювань шляхом узгодження частот дискретизації та переходу до порівняння у спектральній області на частоті випромінювача.

Показано, що поєднання ресемплінгу (цілого та дробового) з антиаліасинговою FIR-фільтрацією та застосуванням FFT (із вікном Блекмана) дозволяє отримати стабільні ряди амплітуд, придатні для автоматизованого зіставлення без втрати фізичного змісту сигналу.

У метод включено попередні перевірки коректності налаштувань FDTD (просторова роздільна здатність, умова стійкості CFL, наявність піку та фазова узгодженість), що зменшує ризик інтерпретації числових артефактів як фізичного результату.

За результатами серії з 5 експериментів продемонстровано, що виділення цільової частоти 20 Гц знижує вплив широкосмугового шуму натурних даних і забезпечує менші та менш варіативні значення MSE порівняно з оцінюванням на “сирих” часових реалізаціях.

Практичне застосування абсолютного відхилення та відносного коефіцієнта дозволяє розрізняти систематичні похибки моделі (завищення/заниження) та грубі аномалії (втрата сигналу), що робить метод придатним для інтеграції у програмні комплекси контролю якості моделювання. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення методу на багаточастотні режими та використання додаткових метрик (RMSE, кореляція, спектральна когерентність).

ЛІТЕРАТУРА

1. Oppenheim A. V., Schafer R. W., Buck J. R. Discrete-Time Signal Processing. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 1999. P. 168.
2. Antoniou A. Digital Signal Processing. New York : McGraw-Hill, 2006. P. 830.
3. Cetin A. E., Gerek O. N., Yardimci Y. Equiripple FIR filter design by the FFT algorithm // IEEE Signal Processing Magazine. – 1997. – March. – P. 60–64.
4. Vargas-Rubio J. G., Santhanam B. On the multiangle centered discrete fractional Fourier transform // IEEE Signal Processing Letters. – 2005. – Vol. 12, no. 4. – P. 273–276.
5. Joseph R. M., Taflove A. Spatial soliton deflection mechanism indicated by FDTD Maxwell's equations modeling // IEEE Photonics Technology Letters. – 1994. – Vol. 6, no. 10. – P. 1251–1254.
6. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // IBM Journal of Research and Development. – 1967. – Vol. 11, no. 2. – P. 215–234.
7. Mean Squared Error (MSE) [Електронний ресурс] // Probability Course. – Режим доступу: <https://www.probabilitycourse.com>.
8. Analysis of multipath acoustic field variability and coherence in the finale of broadband basin-scale transmissions in the North Pacific Ocean / J.A. Colosi et al. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2005. Vol. 117, no. 3. P. 1538–1564.
9. Roux P., Sabra K.G., Kuperman W.A., Roux A. Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2005. Vol. 117, no. 1. P. 79–84.
10. Sabra K.G., Roux P., Kuperman W.A. Emergence of the Green's function from the cross-correlation of ambient noise in an oceanic waveguide. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2005. Vol. 118, no. 6. P. 3524–3531.
11. McDonald M.A., Hildebrand J.A., Wiggins S.W. Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2006. Vol. 120, no. 2. P. 711–718.
12. Siderius M., Harrison C.H., Porter M.B. A passive fathometer for determining bottom depth and imaging seabed layering using ambient noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2006. Vol. 120, no. 3. P. 1315–1323.

REFERENCES

1. Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., & Buck, J. R. (1999). *Discrete-Time Signal Processing* (2nd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
2. Antoniou, A. (2006). *Digital Signal Processing*. McGraw-Hill.
3. Cetin, A. E., Gerek, O. N., & Yardimci, Y. (1997, March). Equiripple FIR filter design by the FFT algorithm. *IEEE Signal Processing Magazine*, 60–64.
4. Vargas-Rubio, J. G., & Santhanam, B. (2005). On the multiangle centered discrete fractional Fourier transform. *IEEE Signal Processing Letters*, 12(4), 273–276. <https://doi.org/10.1109/LSP.2005.843762>
5. Joseph, R. M., & Taflove, A. (1994). Spatial soliton deflection mechanism indicated by FDTD Maxwell's equations modeling. *IEEE Photonics Technology Letters*, 6(10), 1251–1254. <https://doi.org/10.1109/68.329654>

6. Courant, R., Friedrichs, K., & Lewy, H. (1967). On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM Journal of Research and Development*, 11(2), 215–234. <https://doi.org/10.1147/rd.112.0215>
7. Mean Squared Error (MSE). (n.d.). In *Probability Course*. Retrieved September 12, 2020, from <https://www.probabilitycourse.com>
8. Colosi, J. A., Baggeroer, A. B., Cornuelle, B. D., Dzieciuch, M. A., Munk, W. H., Worcester, P. F., Dushaw, B. D., Howe, B. M., Mercer, J. A., Spindel, R. C., Birdsall, T. G., Metzger, K., & Forbes, A. M. G. (2005). Analysis of multipath acoustic field variability and coherence in the finale of broadband basin-scale transmissions in the North Pacific Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(3), 1538–1564. <https://doi.org/10.1121/1.1854611>
9. Roux, P., Sabra, K. G., Kuperman, W. A., & Roux, A. (2005). Ambient noise cross correlation in free space: Theoretical approach. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(1), 79–84. <https://doi.org/10.1121/1.1830673>
10. Sabra, K. G., Roux, P., & Kuperman, W. A. (2005). Emergence of the Green's function from the cross-correlation of ambient noise in an oceanic waveguide. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(6), 3524–3531. <https://doi.org/10.1121/1.2109059>
11. McDonald, M. A., Hildebrand, J. A., & Wiggins, S. W. (2006). Increases in deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(2), 711–718. <https://doi.org/10.1121/1.2216565>
12. Siderius, M., Harrison, C. H., & Porter, M. B. (2006). A passive fathometer for determining bottom depth and imaging seabed layering using ambient noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(3), 1315–1323. <https://doi.org/10.1121/1.2227371>

Received 11.02.2026
Accepted 16.02.2026
Published 31.03.2026

A validation method for numerical models of hydroacoustic wave propagation using sampling-rate matching and spectral estimation

This paper proposes a practical validation method for numerical hydroacoustic wave-propagation models using field measurements in situations where the “raw” model output and the sensor recordings have different sampling rates. Such a mismatch is typical for finite-difference time-domain (FDTD) simulations: the model time step (and thus the effective sampling rate) is constrained by grid spacing and medium properties, whereas the measurement system samples with a fixed hardware rate. As a result, direct overlay and point-wise comparison in the time domain becomes mathematically incorrect and may lead to misleading conclusions. The goal of the study is to develop an automated comparison procedure that (i) consistently matches sampling rates, (ii) extracts a physically meaningful and informative signal component, and (iii) enables stable quantitative assessment of model-to-measurement agreement.

The proposed pipeline starts with selecting a target sampling rate that guarantees a power-of-two record length, which is required for efficient FFT processing and helps standardize subsequent spectral estimation. Depending on the relationship between the original and target rates, the method applies either integer decimation or fractional resampling. To prevent aliasing, resampling is combined with anti-aliasing FIR filtering; the implementation

is organized to avoid unnecessary computations for samples that would be discarded after decimation. After resampling, the signal is transferred from the time domain to the frequency domain. To reduce spectral leakage caused by finite windowing, a Blackman window is applied prior to the FFT. Instead of comparing full broadband waveforms that may be strongly affected by ambient noise, multipath interference, and sensor artifacts, the method extracts the amplitude at the known transmitter (carrier) frequency and forms comparable amplitude time series for the model and the field data.

Before computing any accuracy metrics, the algorithm performs a set of automatic correctness checks aimed at rejecting numerically unreliable configurations and non-informative comparisons. These checks include: spatial resolution adequacy (sufficient number of grid points per wavelength), verification of the CFL stability condition (Courant number), detection of a pronounced spectral peak at the target frequency, and polarity/anti-phase detection based on the sign of the zero-lag correlation to avoid falsely “good” agreement due to sign inversion. Model quality is then quantified using complementary measures computed on normalized amplitude series: absolute deviation (ΔE), a relative ratio coefficient (K), and mean squared error (MSE). A series of validation experiments demonstrates that isolating the target frequency significantly reduces the influence of broadband noise and yields a more stable and informative assessment compared with evaluation on raw time-domain signals. The method is intended for integration into software validation toolchains where reproducibility, automation, and robustness to heterogeneous sampling conditions are critical.

Keywords: hydroacoustics; model validation; sampling-rate matching; resampling; anti-aliasing; FIR filtering; FFT; Blackman window; FDTD; Courant number (CFL); spectral estimation; MSE.

Гейко Олег Олександрович – аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3279-8274>

Варава Іван Андрійович – к.т.н., доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9874-016X>

Пуха Геннадій Сергійович – молодший науковий співробітник Особливого конструкторського бюро «ШТОРМ», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5728-1577>

Дембіцький Валентин Валентинович - аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4119-4742>

Вдовина Анастасія Валеріївна – студентка, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1116-708X>

Heiko Oleh – PhD student, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3279-8274>

Varava Ivan – PhD, Associate Professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9874-016X>

Pukha Hennadii – Junior Researcher, Special Design Bureau “STORM”, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5728-1577>

Dembitskyi Valentyn – PhD student, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4119-4742>

Vdovyna Anastasiia – student, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1116-708X>