

УДК 621.391.8:621.396.946

DOI: 10.31673/2412-9070.2023.043040

О. Р. ЖУКОВА¹, ст. викладач;Т. В. МЕЛЕШКО², здобувач,¹ Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ² Національний авіаційний університет, Київ

ОПЕРАТИВНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РОБОЧИХ ЧАСТОТ ДЛЯ ДАЛЕКОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ ЗА УМОВ ВПЛИВУ НЕФЛУКТУАЦІЙНИХ ЗАВАД

Проведено аналіз методів ковзного середнього і ковзної медіани, які широко використовуються для побудови емпіричних моделей у процесі прогнозування оптимальних робочих частот. Показано причини одержуваних при цьому спотворень.

Викладено методичні основи оброблення результатів дискретних спостережень, розроблених для проведення прогнозування в оперативному режимі значень оптимальних робочих частот для виділеного каналу радіозв'язку за умов впливу нефлюктуаційних завад.

Спектральний аналіз, який використовують для розрахунку математичного сподівання, показав, що через усереднення такі моделі не дають змоги виявити вплив на іоносферу зовнішніх джерел збурення. Тобто, в разі такого усереднення разом із випадковою складовою, яка дорівнює нулю, з розгляду виводять вплив іоносферних нефлюктуаційних збурень на радіозв'язок. Щоб урахувати вплив іоносферних збурень, у стандартну модель іоносфери ці нефлюктуаційні збурення додають окремо. Крім того, у геофізиці велику увагу приділено розрахункам різноманітних середніх по днях, місяцях, за роками тощо. Важливо встановити, якою мірою здобуті результати можуть бути вільні від непереборних спотворень через дискретизацію.

Умовою екстрапольованості процесу є обмеженість його за спектром, тому для отримання обмеженого спектра дані спостережень потрібно піддати цифровій низькочастотній фільтрації (замість операцій рівноважного усереднення або ковзної медіани). Для первинного опрацювання даних пропонується послідовне з'єднання двох фільтрів: неперервного рівноважного усереднення та ідеального фільтра низьких частот. Характеристики фільтра виправленого неперервного осереднення найкраще відповідає фільтр Чебишева.

На основі методу цифрової екстраполяції запропоновано метод прогнозування даних спостережень. Наведено умови екстрапольованості реального процесу. Розроблено комплекс програм для реалізації прогнозу оптимальних робочих частот у реальному масштабі часу.

Ключові слова: іоносфера; медіана; оперативний прогноз; оптимальна робоча частота; екстраполяція; нефлюктуаційна завада.

Вступ

Для визначення характеристик іоносфери важливо знати параметри радіолінії в точці відбиття протягом сеансу зв'язку, оскільки параметри іоносфери мають дуже високу мінливість, що істотно впливає на якість зв'язку.

Оптимальні робочі частоти (ОРЧ) зазвичай визначають заздалегідь (до початку сеансу радіозв'язку), для чого використовують методи прогнозування, що є емпіричними моделями критичної частоти шару F2 спокійної іоносфери [1-4], які ґрунтуються на обчисленні ковзного середнього арифметичного, або ковзної медіани [3-5]. У цих моделях вихідне значення критичної частоти подається сумою стаціонарної та випадкової складових. Постійна складова, осереднена статистичними методами, належить до спокійної стандартної іоносфери і рекомендована для використання як модель під час розрахунку максимально застосовних і ОРЧ. Математичне сподівання випадкової величини беруть таким, що дорівнює нулю.

Спектральний аналіз, який застосовують для операції обчислення математичного сподівання, показав, що через усереднення такі моделі не дають змоги виявити вплив на іоносферу зовнішніх джерел збурення, тобто в разі такого усереднення разом із випадковою складовою, яка дорівнює нулю, з розгляду відкидають вплив іоносферних нефлюктуаційних завад на радіозв'язок. Щоб урахувати вплив іоносферних збурень, у стандартну модель іоносфери ці впливи додають окремо [4]. Крім того, у геофізиці велику увагу приділено розрахункам різноманітних середніх по днях, місяцях, за роками тощо. Важливо знати, якою мірою результати таких розрахунків можуть бути вільні від непереборних спотворень через дискретизацію.

Основна частина

Розглянемо спектральні характеристики операції ковзного рівноважного усереднення з метою виявлення можливих спотворень, зумовлених особливостями їхньої частотної характеристики. Оператор

© О. Р. Жукова, Т. В. Мелешко, 2023

неперервного змінного середнього арифметичного нерідко використовують під час чисельного розрахунку математичного сподівання [5].

Розглянемо частотні характеристики неперервного змінного усереднення (рис. 1). Дію фільтра неперервного змінного середнього на спостережуваній гармонічний процес зображено на рис. 1, а.

Середнє значення $\bar{\vartheta}$ за інтервал часу $[-T/2; +T/2]$, віднесене до моменту t , становить

$$\bar{\vartheta}(t) = \frac{\theta}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} \cos(\omega t + \varphi) dt = \theta \frac{\sin \chi}{\chi} (\omega t + \varphi), \quad \chi = \frac{\omega t}{1=2}. \quad (1)$$

Вираз для $\bar{\vartheta}$ може бути записано у вигляді:

$$\bar{\vartheta}(t) = \bar{\theta}(\omega) \cos(\omega t + \varphi); \quad \bar{\theta}(\omega) = \theta \frac{\sin \chi}{\chi}, \quad (2)$$

а його частотну характеристику

$$D(\omega) = \frac{\sin \chi}{\chi} \quad \text{або} \quad D(f) = \frac{\sin \pi f T}{\pi f T}. \quad (3)$$

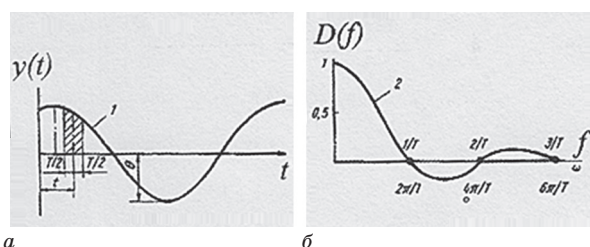


Рис. 1. Фільтр змінного неперервного середнього:
а — спостережуваний процес; б — частотна характеристика

Вираз (3) можна назвати амплітудно-фазовою характеристикою, оскільки власне фазові зсуви відсутні, тобто $\varphi(\omega) = 0$, але є інверсії фази в точках $D(\omega) = 0$, де амплітуда $\bar{\vartheta}(\omega)$ змінює знак (рис. 1, б). Ці особливості однозначно визначаються виразом (3).

Як приклад розглянемо дію фільтра, що зменшує невизначеність, для випадку, коли усереднення проводять за добу $T = 1$, і його результати фіксують також раз на добу, отже, частота Найквіста $\omega_H = \pi$, $f_H = \frac{1}{2}$ 1/доба.

Піддамо фільтрації процес

$$y(t) = 20 \cos\left(\frac{\pi}{180} t - \frac{\pi}{2}\right) + 5 \cos(2\pi t + \varphi_2) + \cos(3\pi t + \varphi_3) + \cos(4\pi t + \varphi_4) + \cos(192\pi t + \varphi_5).$$

Амплітудно-фазову характеристику операції рівноважного осереднення та результат операції $y(t)$ наведено на рис. 2:

$$\bar{y}(t) = 20 \cos\left(\frac{\pi}{180} t - \frac{\pi}{2}\right) - 0,21 \cos(3\pi t + \varphi_3),$$

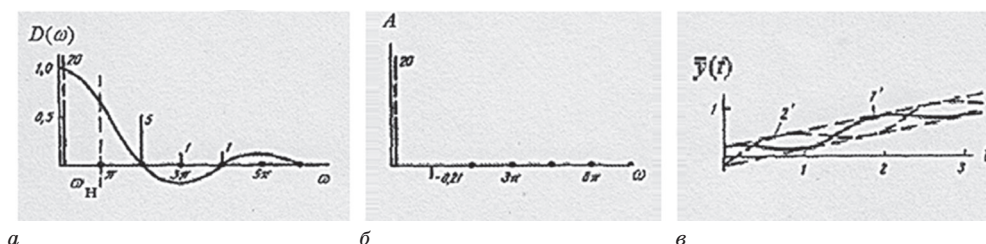


Рис. 2. Приклад впливу мімікрії частот: а — частотна характеристика за добу і спектр вихідного процесу ($\varphi_i = 0$); б — спектр відновленого процесу ($\varphi_i = 0$); в — відновлений процес ($1' - \varphi_3 = 0, 2' - \varphi_3 = \pi$)

Після дискретизації за добу $\Delta t = 1$ і подальшого відновлення дістанемо вирази:

$$\tilde{y}(t) = 20 \cos\left(\frac{\pi}{180} t - \frac{\pi}{2}\right) - 0,21 \cos(\pi t + \varphi_3);$$

$$\bar{y}(t) = 20 \cos\left(\frac{\pi}{180} t - \frac{\pi}{2}\right) - 0,21 \cos(3\pi t + \varphi_3),$$

в яких з'явилася відсутня раніше складова з дводобовим періодом ($\omega = \pi$) і невласною фазою (див. рис. 2, в). Якщо зрушити моменти (що вимагається від прогнозу), до яких належать результати усереднення, на 16 год, тобто на період складової з частотою $\omega = 3\pi$, то відновлений процес буде подано пунктирною лінією. Отже, в результаті осереднення з'явиться хибна складова з амплітудою - 0,21.

З наведеного прикладу випливає, що НСЗ не позбавлене недоліків і не може вважатися еталонним фільтром: мабуть, замало фіксувати середньодобові дані лише раз на добу, якщо хочемо здобути ре-

зультати, вільні від спотворень. Цей підхід не слід використовувати для побудови емпіричних моделей іоносфери.

Іншою операцією, яка досить часто зустрічається в науковій літературі щодо оброблення іоносферних даних, є операція усереднення за допомогою методу ковзної медіани. Вона вирізняється простотою і вважається робастним оцінюванням середнього [7]. Алгоритм розрахунку медіани побудовано впорядкуванням даних за ознакою зростання їхніх значень. Операція медіанного усереднення є нелінійною. У результаті усереднення відбувається спотворення спектра: збуджуються хибні складові на нульовій частоті та на частотах кратних гармонік (рис. 3).

З рис. 3 випливає, що операція розрахунку ковзної медіани супроводжується появою неправдивих складових — постійної складової і кратних гармонік. Амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) медіани для інтервалів усереднення за п'ятьма і десятьма відліками наведено на рис. 3, б. Для побудови АЧХ використовували метод експериментального визначення АЧХ через надходження на вхід оператора розрахунку медіани синусоїдного сигналу $y(t) = \sin ft$ із різними значеннями f . Отримують АЧХ завдяки побудові амплітуди основної гармоніки на виході оператора медіани як функції від f .

Відомий американський математик Дж. В. Тьюкі, який зробив великий внесок у теорію чисельних методів, називав операцію розрахунку медіани робастним оцінюванням змінного середнього і використовував розрахунок медіани для виділення тренда (згладжування). Крім того, Тьюкі вважав, що операція медіана корисна для усунення неправдоподібних членів [8]. Слід, однак, зазначити, що Тьюкі, крім ковзної медіани, застосовував додатково згладжувальний фільтр Геннінга — ця спільна процедура називалася «Тьюкі 53X». А якщо взяти до уваги, що в «Тьюкі 53X» застосовували послідовно дві операції розрахунку медіани за п'ятьма і трьома відліками, то можна стверджувати, що операцію згладжування здійснював цифровий фільтр Геннінга, а медіану використовували виключно для видалення неправдоподібних відліків.

Застосування змінних режимів обчислення середнього арифметичного і медіани в емпіричних моделях IRI [5] дають розбіжність із вимірюваними даними в 1 МГц, що видається малоефективним для одержання адекватних оперативних прогнозів під час розрахунку робочих частот радіотрас.

Прогнозування радіотрас у дециметровому діапазоні поділяють на три категорії: довгострокове прогнозування, короткострокове й оперативне. Розглянемо побудову оперативного прогнозування для отримання критичних частот у потрібній ділянці іоносфери.

Уважатимемо, що інтервал оперативного прогнозування не перевищує однієї доби. Згідно з (1) і наведеним раніше розрахунком, якщо спектр випадкової складової $s(t)$ міститься в низькочастотній ділянці з періодом від однієї до кількох годин, то випадкові складові з такими періодами стають значущими під час одержання оперативного прогнозу і мають враховуватися. У цьому разі статистичні методи прогнозування, засновані на мінімумі математичного сподівання випадкової складової, для оперативного прогнозу не підходять.

Для отримання оперативного прогнозу потрібно розв'язати дві важливі задачі: розробити алгоритм прогнозування й організувати оперативне збирання даних і передавання їх споживачеві в реальному масштабі часу [10]. У статті для розв'язання задачі прогнозування запропоновано алгоритм екстраполяції, заснований на ідеї розв'язання задачі апроксимації розривних функцій [5; 10]. Прогнозування зазнають дані спостереження, що розглядаються як фінітний процес. Для реалізації алгоритму екстраполяції потрібне попереднє опрацювання цих даних із метою обмеження їхнього спектра, що є умовою екстраполяції. Будь-який реальний процес $y(t)$ може бути апроксимовано сумою

$$y(t) = \sum_i a_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

без будь-яких обмежень її спектрального складу. Спектр $y(t)$ може містити окремі лінії і суцільні ділянки. Тут a_i — амплітуда; ω_i — колова частота; φ_i — початкова фаза; i — номер гармоніки.

Залежно від умов поширення радіохвиль, місця, часу організації, технічних характеристик каналів радіозв'язку в них існує велика кількість різних завод. Це заводи флуктуаційного (шумового) та нефлуктуаційного типів, адитивні і мультиплікативні. До числа найбільш поширених нефлуктуаційних завод належать сигналподібні, зокрема вузькосмугові, наприклад гармонічні, а також імпульсні заводи. Вони можуть мати різний частотний розлад, а рівні таких завод звичайно менші або співмірні з рівнем корисного сигналу [2; 7; 8].

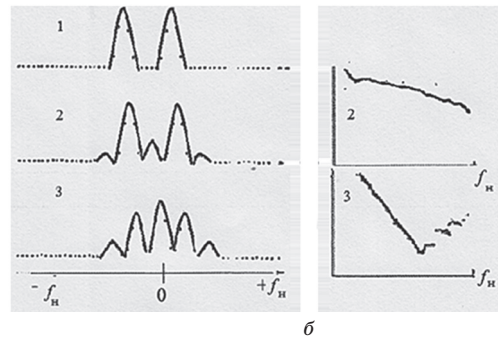


Рис. 3. Спектри вхідного і вихідного сигналів медіанного фільтра (а) та АЧХ змінної медіани (б): 1 — вхідного сигналу; 2 — медіанного усереднення за п'ятьма відліками; 3 — медіанного усереднення за 10-ма відліками; f_H — частота Найквіста

Найбільшу інтенсивність впливу іоносфери на значення оптимальних робочих частот у процесі організації далекого радіозв'язку буде чинити ретрансльована завада:

$$S_R(t) = \mu S_i \cos [t - \tau, \varphi_p],$$

де τ — часова затримка; φ_p — випадкова початкова фаза завади, рівномірно розподілена на напівінтервалі $(-\pi, +\pi]$.

До складу суми (4) можуть входити складові з кратними частотами, наприклад, добовий і річний хід геофізичного параметра. Оперативне прогнозування процесу, поданого виразом (4), доцільно проводити окремо у двох частотних діапазонах: добовий хід — складові з періодом від 4 до 24 год; високочастотні — від частоти Найквіста до 4 год. Виокремлення спектральних діапазонів здійснюється методами цифрової фільтрації.

Як метод прогнозування вибрано метод екстраполяції, якої зазнають дані спостереження на кінцевому інтервалі часу ΔT . Він описується одиничною прямокутною функцією $v(t)$. З огляду на (4) та без нефлюктуаційних завад математичний вираз відліків дискретних даних набирає такого вигляду:

$$y(n) = v(t_n) \sum_i a_i \sin(\omega_i t_n + \varphi_i), \quad (5)$$

де t_n — момент часу відліку; $v(t_n)$ — відліки виокремлювальної функції; $n = 1, 2, \dots, N$.

Вираз (5) представляє відомі N відліків реального процесу, заданих на кінцевому інтервалі ΔT . Завдання екстраполяції зводиться до визначення значень $y(t)$, поданих виразом (4), через відомі відліки $y(n)$, які згідно з (5) можна розглядати як суму хвильових пакетів із тривалістю, що дорівнює ΔT .

Для того щоб побудувати алгоритм екстраполяції процесу за скінченною кількістю $y(n)$, достатньо розробити алгоритм екстраполяції складової процесу (5), а саме $v(t_n) a_0 \sin(\omega_0 t_n + \varphi_0)$. Назвемо його хвильовим пакетом. При цьому кінцеві точки слід розглядати як точки розриву. Зазначимо, що під час апроксимації функції з розривами виникає явище Гіббса, що згубно позначається на проведенні прогнозування, зокрема й методами регресії.

Побудуємо спектр хвильового пакета, вираз якого можна подати в такий спосіб:

$$F(\omega) = \frac{a_0(2N+1)}{4\omega_H} e^{j\varphi_0} \frac{\sin \pi(2N+1) \frac{\omega_0 - \omega}{2\omega_H}}{(2N+1) \sin \pi \frac{\omega_0 - \omega}{2\omega_H}} + \frac{a_0(2N+1)}{4\omega_H} e^{j\varphi_0} \frac{\sin \pi(2N+1) \frac{\omega_0 + \omega}{2\omega_H}}{(2N+1) \sin \pi \frac{\omega_0 + \omega}{2\omega_H}}.$$

Хвильовий пакет і його спектр зображено на рис. 4, з якого випливає, що спектр хвильового пакета $v(t_n) a_0 \sin(\omega_0 t_n + \varphi_0)$ являє собою модульований сигнал.

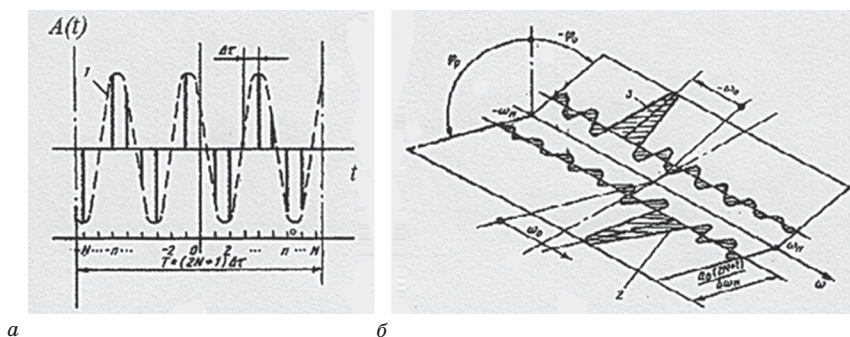


Рис. 4. Хвильовий пакет (а) і його спектр (б)

Перемноження двох функцій у часовому діапазоні еквівалентно згортці спектрів у частотному. Спектр нескінченної синусоїди, помноженої на виокремлювальну прямокутну функцію, змінився так, як це унаочнює рис. 4, б. Процес множення синусоїди на виокремлювальну функцію можна розглядати як модуляцію синусоїдного сигналу. Для того щоб знайти $a_0 \sin(\omega_0 t_n + \varphi_0)$, достатньо виконати демодуляцію добутку $v(t_n) a_0 \sin(\omega_0 t_n + \varphi_0)$. Скористаємося тригонометричною рівністю

$$\sin \alpha \sin \beta = 1/2 (\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)),$$

яку можна трактувати як добуток двох обмежених за спектром функцій, що має симетричний спектр. Звідси: якщо відомий добуток двох обмежених за спектром функцій має симетричний спектр і відомий один із співмножників, то невідомий співмножник може бути здобуто простим діленням. Це положення є ключовим для проведення демодуляції хвильових пакетів та їх суперпозиції. Одночасно з демодуляцією здійснюють відновлення дискретного хвильового пакета в неперервну функцію за допомогою рядів Котельникова.

Хвильовий пакет із несиметричним спектром (див. рис. 4) перетворюємо в часовому діапазоні так, щоб його спектр був симетричний. Для цього прямокутну виокремлювальну функцію $v(t_n)$ замінимо

зваженою функцією, що має обмежений спектр. Цей захід, загалом, сприяє видаленню точок розриву і пригніченню явища Гіббса.

Вираз для відновлення дискретного процесу за будь-яких значень аргументу набирає вигляду

$$\tilde{y}(d) = \frac{\sum_{n=1}^N y(n) b_n \frac{\sin \pi(d-n)}{d-n}}{\sum_{n=1}^N b_n \frac{\sin \pi(d-n)}{d-n}}, \quad (6)$$

де $d = t/\Delta t$ — безрозмірний час; Δt — інтервал дискретизації; b_n — коефіцієнт зважування виокремлювальної функції; N — кількість дискретних відліків хвильового пакета; $\frac{\sin \pi(d-n)}{d-n}$ — базис Котельникова, який використовують для відновлення дискретного процесу на неперервний.

Вираз (6) може бути використано для апроксимації процесу, поданого дискретними відліками для будь-яких значень аргументу d , зокрема й для прогнозування. Для вузлових точок, що містяться поза зоною відомих значень, маємо:

$$\tilde{y}(d) = \frac{\sum_{n=1}^N y(n) \frac{b_n}{d-n} (-1)^{d-n}}{\sum_{n=1}^N \frac{b_n}{d-n} (-1)^{d-n}}. \quad (7)$$

Тут d набуває цілочисельних значень.

Щодо відновлення неперервної форми дискретного процесу вираз (6) переважно вільний від спотворень, зумовлених явищем Гіббса, а також дає змогу пояснити механізм передавання інформації в царину майбутнього часу. За теоремою Котельникова внесок відліку у відновлений ряд дорівнює базису Котельникова, або функції $\sin x/x$, причому аргумент базисної функції перебуває в нескінченних межах. Якщо відновлювана за Котельниковим функція має обмежений спектр і кількість відліків дорівнює нескінченності, то ряд Котельникова відновлює функцію без спотворень. Картина змінюється, якщо кількість відліків ряду обмежена. У разі скінченного ряду Котельникова виникає явище Гіббса.

Коливання Гіббса спотворюють інформацію між відліками, а за межами скінченного ряду несуть інформацію про всі відомі відліки функції, що апроксимується рядом Котельникова. Чисельник і знаменник виразу (6) є зваженими скінченними рядами Котельникова, а за межами задавання рядів у чисельнику і знаменнику (6) спостерігаються коливання Гіббса. У приватному відліку рядів Котельникова коливання Гіббса значно пригнічено.

У запропонованому алгоритмі немає поділу на випадкову нефлуктаційну і систематичну складову, розглядається весь процес цілком, оскільки й у випадковій складовій містяться явища, властиві іоносфері.

Умови прогнозованості та невизначеність запропонованого методу екстраполяції з очевидністю

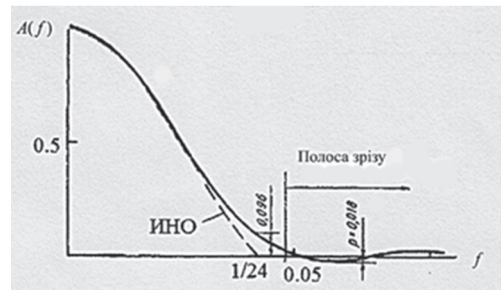
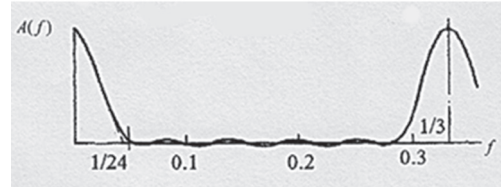
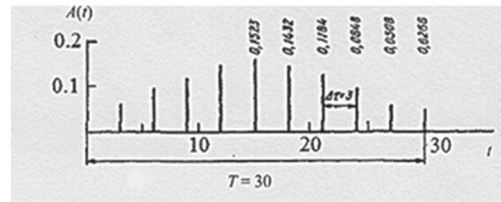


Рис. 5. Приклад Чебишевського фільтра:
а — вагові коефіцієнти для 11-ти відліків;
б — частотна характеристика; в — порівняння АЧЧ-фільтрів Чебишева та ІНО (пунктир)

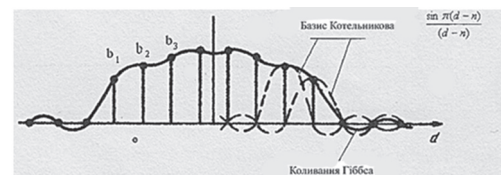


Рис. 6. Виокремлювальна функція $v(d)$

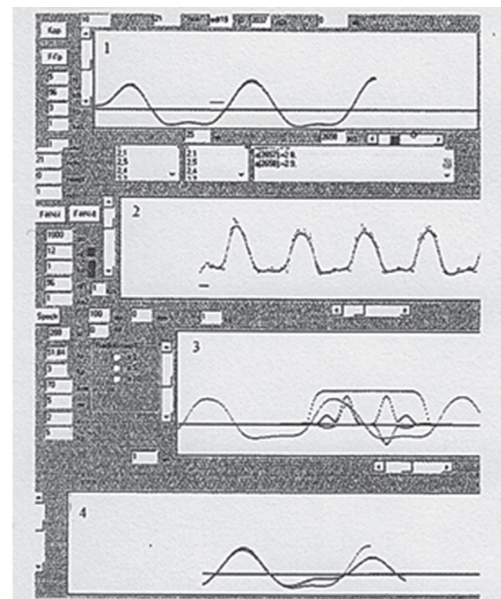


Рис. 7. Панель керування програмним комплексом оброблення іоносферної інформації: 1 — результат фільтрації в приватному діапазоні; 2 — первинне опрацювання вихідних даних низькочастотним фільтром; 3 — спектр сигналу на виході низькочастотного фільтра; 4 — результат прогнозування

впливають із розкладання розглянутого процесу в ряд Тейлора. Якщо екстраполяція — це вираження функції через ту саму функцію, тільки за інших значень аргументу, то прогноз можна здійснювати розкладанням процесу в ряд Тейлора, який можна розглядати як алгоритм екстраполяції за $x > x_0$, де x_0 — значення аргументу, для якого є вимірювання критичної частоти. Умови розкладання функції в ряд Тейлора і є умовами екстраполяції, тобто функція, що екстраполює (апроксимує) хвильовий пакет, має бути неперервною і мати неперервні похідні довільного порядку, або ця функція повинна володіти обмеженим спектром. Точність такого методу прогнозу визначається залишковим членом ряду Тейлора [9].

Для обчислення похідної дискретного процесу продиференціюємо вираз (6) за безрозмірним часом d і дістанемо

$$y'(m) = \sum_{n=1}^N [y(n) - y(m)] \frac{b_n}{b_m} \frac{(-1)^{m-n}}{m-n}, \quad (8)$$

де m — номер відліку, для якого визначають похідну.

Умовою екстрапольованості процесу є обмеженість його за спектром, тому для отримання обмеженого спектра дані спостережень мають зазнати цифрової низькочастотної фільтрації (замість розглянутих раніше операцій рівноважного усереднення або ковзної медіани). Для первинного опрацювання даних пропонується послідовне з'єднання двох фільтрів: неперервного рівноважного усереднення та ідеального фільтра низьких частот. Характеристичі фільтра виправленого неперервного усереднення найкраще відповідає фільтр Чебишева [5; 10].

Чебишевські цифрові фільтри здійснюють зважене усереднення рівновіддалених відліків. Метод обчислення вагових коефіцієнтів засновано на використанні властивостей поліномів Чебишева [7; 8]. Підсумкові дані фільтра: вагові коефіцієнти відліків, частотну характеристику і для порівняння характеристику ІНО наведено на рис. 5. У головній частині смуги пропускання відмінність характеристик Чебишевського фільтра від ІНО незначна. Тому для попереднього оброблення даних спостережень використовують фільтри Чебишева.

Цей цифровий фільтр застосовується для формування обмежених за спектром функцій, наприклад, для розрахунку дискретних відліків виокремлювальної функції b_n :

$$v(d) = \sum_{n=1}^N b_n \frac{\sin \pi(d-n)}{d-n}.$$

Відновлену за дискретними відліками виокремлювальну функцію зображено на рис. 6.

З рис. 6 випливає, що як механізм перенесення інформації у сферу майбутнього виступають коливання Гіббса. Для обчислення коефіцієнтів зважування фільтра b_n розроблено рекурентну схему, подібну до трикутника Паскаля. Такий метод обчислення коефіцієнтів дає змогу досягти ступеня пригнічення у смугі зрізу фільтра, що дорівнює 400 дБ. Оптимальні коефіцієнти виокремлювальної функції вибираються з умови мінімальності ступеня невизначеності прогнозу за допомогою спеціально розробленої програми [9-11].

На основі алгоритму екстраполяції оптимальних робочих частот розроблено програмний комплекс. Панель керування комплексом програм наведено на рис. 7. Ліворуч на панелі керування розташовані «редактори» введення для вибору параметрів керування обробленням експериментальних даних. У вікнах 1-4 відображено результати етапів оброблення.

Висновки

Визначення ОРЧ є основним завданням під час організації далекого радіозв'язку в короткохвильовому діапазоні. ОРЧ розраховують за відомою методикою, з огляду на дані щодо стану іоносфери на околі точок відбиття радіохвиль. Проведений аналіз методів ковзного середнього і медіани показав, що спотворення, які вони вносять у результат оброблення вихідних даних, призводять до помилок прогнозування. Застосування фільтрів виправленого неперервного усереднення дає змогу на основі оперативних експериментальних даних одержувати усереднені характеристики спокійної іоносфери і виокремлювати її збурену складову. Потім окремо вони зазнають прогнозування.

На основі викладеного методу створено комплекс програм в об'єктно-орієнтованому середовищі Delphi, що дає змогу проводити аналіз і прогнозування результатів різних геофізичних параметрів. Застосування запропонованого методу для прогнозу ОРЧ дасть змогу природно брати до уваги вплив іоносферних неоднорідностей на величину критичної частоти, поліпшити визначення ОРЧ і одержати матеріал для досліджень під час розв'язання зворотної задачі радіолокації — оцінювання стану іоносфери і критичних частот шару F2 за результатами радіочастотного зондування.

Список використаної літератури

1. Системи передавання широкосмуговими сигналами / В. О. Балашов, П. П. Воробієнко, Л. М. Ляховецький, В. В. Педяш. Одеса: Вид. центр ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2012. 336 с.
2. Телекомунікаційні системи та мережі. Структура й основні функції / В. В. Попівський, О. В. Лемешко, В. К. Ковальчук [и др.]. 2012. Том 1. URL: <http://www.znanius.com/3534.html>.
3. Стеклов В. К., Костік Б. Я., Беркман Л. Н. Сучасні системи управління в телекомунікаціях. Київ: Техніка, 2005. 400 с.
4. Стеклов В. К., Беркман Л. Н., Кільчицький Є. В. Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку. Київ: Техніка, 2004. 576 с.
5. Сайко В. Г., Амірханов Е. Д. Основи мереж цифрового радіозв'язку і радіодоступу нового покоління. Київ: ДУТ, 2015. 77 с.
6. Зайцев С. В. Математична модель каналу зв'язку з сигналами OFDM та навмисними завадами // Математичні машини і системи. 2011. №4. С. 166–175. URL: <http://dSPACE.nbuv.gov.ua/handle/123456789/83639>.
7. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В. В. Поповський, С. О. Сабурова, В. Ф. Олійник [та ін.]. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. 564 с.
8. Матвійчук Я. М. Елементи теорії систем та макромодельовання: навч. посіб. Львів: Вид. Інституту підприємництва та перспективних технологій при НУ ЛП, 2004. 356 с.
9. Головін Ю. О. Основи радіозв'язку: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Політехніка, 2021. 234 с.
10. Швець В., Мелешко Т. Оцінка завадозахищеності когерентного прийому сигналів з багатопозиційною фазовою маніпуляцією при наявності нефлюктуаційних завад // *Measuring and computing devices in technological processes*. 2023. №2. С. 167–178. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-21c>

O. Zhukova, T. Meleshko

OPERATIONAL FORECASTING OF OPTIMAL OPERATING FREQUENCIES FOR LONG-RANGE RADIO COMMUNICATIONS UNDER THE INFLUENCE OF NON-FLUCTUATING INTERFERENCE

The analysis of the methods of moving average and moving median, which are widely used to build empirical models for forecasting optimal operating frequencies, is carried out. The reasons for the resulting distortions are shown.

The methodological bases for processing the results of discrete observations developed for the operational forecasting of the values of optimal operating frequencies for a dedicated radio communication channel under the influence of non-fluctuating interference are described.

The spectral analysis used to calculate the mathematical expectation shows that, due to averaging, such models do not make it possible to detect the influence of external sources of perturbation on the ionosphere. That is, in the case of such averaging, together with the random component, which is zero, the effect of ionospheric non-fluctuating disturbances on radio communications is excluded from consideration. To account for the influence of ionospheric disturbances in a standard ionosphere model, these non-fluctuating disturbances are added separately. In addition, in geophysics, much attention is paid to the calculation of various averages for days, months, years, etc. It is important to establish to what extent the results obtained can be free from insurmountable distortions due to discretization.

A condition for the extrapolability of the process is its spectrum limitation, so to obtain a limited spectrum, the observation data must be subjected to digital low-pass filtering (instead of the operations of equal-weighted averaging or moving median). For the initial data processing, it is suggested to connect two filters in series: a continuous weighted averaging and an ideal low-pass filter. The Chebyshev filter is the best fit for the characteristics of the corrected continuous averaging filter.

Using the method of digital extrapolation, a method for forecasting observation data is presented. The conditions of extrapolability of the real process are given. A set of programs for realizing the forecast of optimal operating frequencies in real time has been developed.

Keywords: ionosphere; median; operational forecasting; optimal operating frequency; extrapolation; non-fluctuating interference.